

EL CONCRETO

FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS

Ricardo Matallana Rodríguez



EL CONCRETO

FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS

Ricardo Matallana Rodríguez



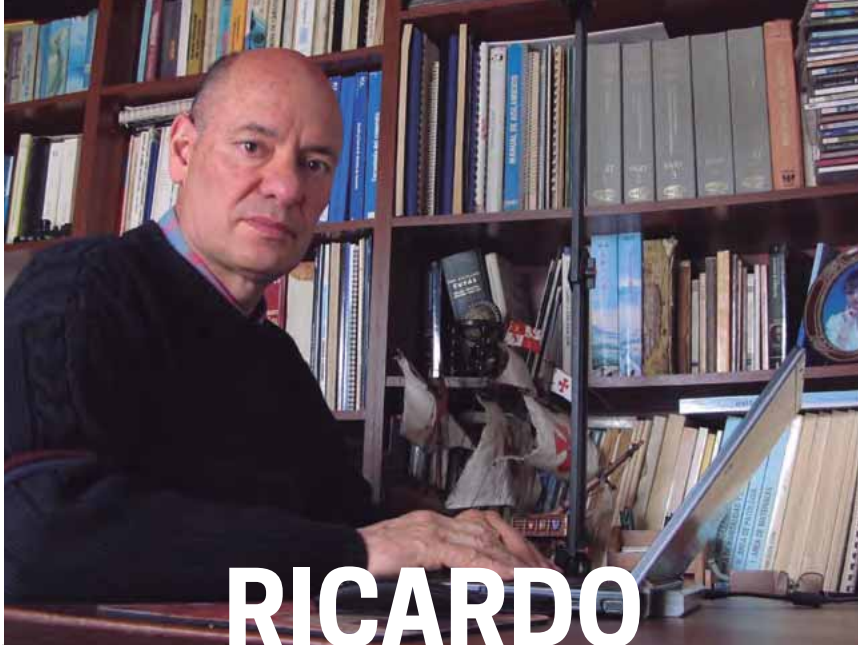
corona

Matallana, Ricardo.
El Concreto Fundamentos y Nuevas Tecnologías. Corona.
ISBN:
Versión física: 978-958-57497-3-3
Versión electrónica: 978-958-57497-4-0

Editor Académico: Juan Fernando Arango Londoño, PhD.
Revisión de estilo: Humberto De La Cruz Arroyave.
Diagramación: Fredy H. Arias Rios.
Ajustes a diagramación: Laura Victoria González
Fotografías e ilustraciones © : Juan David Velasquez†
Juan Fernando Arango*, Fredy Arias y Juan F. Arango*
John Fernando Herrera Rojo *

Aviso legal

Esta publicación fue elaborada siguiendo estrictos rigores metodológicos, cuyos propósitos son exclusivamente académicos y de reflexión técnica. Está dirigida a profesionales calificados y competentes para evaluar la relevancia y las limitaciones de la información. El uso que se haga de su contenido en procesos de diseño y construcción particulares, será responsabilidad exclusiva de las personas que lo hagan, sin comprometer al autor, el editor, Constructora Conconcreto, Corona, ni a sus filiales o subsidiarias.



RICARDO

Matallana Rodríguez

Ingeniero Civil de la Universidad Militar Nueva Granada de Bogotá, con estudios de postgrado en el Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento, en Madrid (España), complementados con pasantías técnicas en el Instituto Técnico de Materiales y Construcciones – INTEMAC, en España, y la Asociación Británica del Cemento – BCA, en Inglaterra; tomó el curso sobre cemento, impartido por Holderbank (hoy Lafarge – Holcim).

Trabajó en el Departamento Técnico de la Asociación Colombiana de Productores de Concreto – ASOCRETO, en la División de Servicio Técnico de Holderbank, la Dirección de asuntos gremiales del Instituto Colombiano de Productores de Cemento – ICPC, y en el área de especificaciones en Toxement (Euclid). Fue coordinador y es miembro de los comités de normalización de cemento, y prefabricados en concreto del Icontec.

En la actualidad, es consultor independiente, y examinador y capacitador de las certificaciones impartidas por el Instituto Americano del Concreto - ACI. Es catedrático de la universidad de Los Andes en el área de Concreto, y en la Escuela Colombiana de Ingeniería en materiales para ingeniería civil. Ha sido profesor en la Universidad Nacional en la cátedra de materiales para estructuras; en La Universidad Santo Tomás, en la maestría de construcción de obras de infraestructura, en los módulos de concretos y patología del concreto; en la Universidad Católica y la Universidad Militar, en la cátedra de concreto en las respectivas especializaciones en pavimentos.

Autor del libro Fundamentos de Concreto Aplicados a la Construcción, editado por el ICPC, así como de varios artículos especializados para diversas revistas.

*A la memoria de mi hermano
Augusto, luz, guía y faro
como ninguno*

*Con un agradecimiento a Dios,
fuente suprema de toda sabiduría*

Prólogo

Con innovación y trabajo colaborativo nuestro compromiso es concreto

La ingeniería y construcción en Colombia enfrentan retos y oportunidades inmensos para transformarse en el actor relevante que el país necesita para su crecimiento, desarrollo y competitividad. Debemos ponernos al día. El compromiso es inmenso, requiere atender las necesidades de infraestructura y vivienda de los ciudadanos con espacios más seguros y confortables que estén en sintonía con un nuevo mundo. La construcción es un oficio que viene con prácticas del pasado, pero que necesita adaptarse al futuro, que es justo hoy.

El concreto ha sido históricamente un material protagonista en las grandes obras de ingeniería y construcción del país, así como en los medianos y pequeños proyectos y está asociado a su versatilidad, desempeño y accesibilidad en un entorno como el nuestro. Este material ha sido utilizado por años por el ser humano en sus construcciones. Sin embargo, el presente y futuro del sector exigen un concreto con atributos y propiedades que le permitan mejorar su desempeño en términos de durabilidad, resistencia, peso y que esté sintonizado con el compromiso ambiental. Adicionalmente, siempre hay que tener presente la enorme responsabilidad que implica la construcción de edificios y de infraestructura, en la que viven, trabajan y se movilizan miles de personas, y esto exige un manejo muy responsable desde el diseño, la producción de materiales, los métodos constructivos y el control de los concretos en obra.

En un mundo tan dinámico, y en el que el trabajo colaborativo ha sido relevante para innovar en el sector de la ingeniería y la construcción, en nuestras compañías, Corona y Constructora Conconcreto, asumimos el desafío de unir conocimientos y capacidades para desarrollar productos innovadores.

Nuestro compromiso con las nuevas generaciones es permanente y esperamos aportar nuevo conocimiento para la ingeniería y construcción con este libro, El Concreto Fundamentos y Nuevas Tecnologías, del ingeniero Ricardo Matallana Rodríguez, quien es un reconocido profesor en el área en las más prestigiosas universidades de Bogotá, con experiencia en normatividad y la certificación de profesionales en el manejo del concreto para el ACI. Esperamos entregarle a la academia un texto con contenido profundo, actual e innovador alrededor del concreto y sus aplicaciones.

Nos sentimos muy contentos de promover esta iniciativa e invitamos al mundo académico y empresarial del sector a estudiar su contenido y aplicarlo para que, juntos, demos pasos firmes y veloces para avanzar hacia las nuevas tendencias de la ingeniería y la construcción en Colombia que nos permitan mejorarles la calidad de vida a sus habitantes.

Agradecimientos del autor

El autor agradece a las directivas de las empresas Corona y Constructora Conconcreto, por la creencia, estímulo y apoyo en la investigación, innovación y difusión de la tecnología, en especial el de ese maravilloso material llamado concreto. De manera específica, se destaca el constante y decidido apoyo de la ingeniera Ana María Mesa Mejía, y de los invaluable aportes del ingeniero Juan Fernando Arango Londoño. También quiero resaltar el buen trabajo realizado por el practicante de ingeniería John Fernando Herrera Rojo.

Agradecimientos del editor

Esta obra fue posible gracias a las contribuciones y el trabajo de un gran número de personas entre las que resaltamos:

En Constructora Conconcreto

Ana María Mesa Mejía
Loly Rodríguez Lara
Lina Marcela Cuartas Ospina
Carolina Morales Ramírez
John Fernando Herrera Rojo

En Corona

Carlos Esteban Villa Santamaría
Susana Mejía Mejía
Darwin Torres
Andrés Felipe Pérez

Otras entidades

Laboratorios Contecon-Urbar (SGS)
Universidad Nacional de Colombia. Laboratorios. Bogotá

Prólogo

del Editor

El estudio y la práctica del concreto se encuentran cuidadosamente presentados en este libro. Sin duda, los libros de tecnología del hormigón escritos por el profesor Ricardo Matallana fueron la base de formación de muchos profesionales. Este nuevo texto ampliado, profusamente ilustrado y muy actualizado, será una fuente obligada de estudio, consulta y referencia.

Hemos hecho un esfuerzo para que este texto incluya elementos pedagógicos novedosos que faciliten su uso. Hemos resaltado las principales definiciones de los conceptos clave e incorporado una diagramación atractiva. Más importante, por la manera en que está estructurada la obra, el autor inicia con la introducción de los conceptos básicos de la tecnología del concreto. Luego, capítulo tras capítulo, los profundiza y amplía basado en sus componentes: los cementantes y agregados, el agua, aire y los aditivos. Más adelante, detalla las propiedades del concreto que servirán como referente para el diseño de las mezclas: concretos comunes, especiales y con agregados livianos. Finalmente aborda los procesos de colocación, curado y calidad. Esta ruta le permite al lector ir ascendiendo, progresivamente, en la profundidad de los temas y le da sentido práctico a los aspectos tratados.

Estamos seguros que uno de los capítulos que más llamarán la atención es el dedicado al concreto estructural liviano. Este tipo de concreto se aborda por primera vez en profundidad en los escritos del profesor Matallana y responde a la creciente necesidad de usar tecnologías de menor peso para la construcción, especialmente aquellas que están debidamente probadas y normalizadas. Este es el caso de los agregados termo expandidos livianos, para los que se había contemplado la posibilidad de que estuvieran incluidos en los requisitos de diseño en la Norma Sismo Resistente Colombiana, NSR-98. Pero, sólo fue hasta su actualización, en la NSR-10, en la que autorizó su uso, debido al interés de varios profesionales visionarios, entre ellos, el también profesor Jorge Segura Franco.

Muchos profesionales hemos querido tener estos nuevos materiales para el mercado colombiano, que son una realidad a partir de los esfuerzos innovadores de Corona y Constructora Conconcreto.

Como editor, espero que este libro continúe con la tradición de los libros del profesor Matallana: que sea la guía en la formación de nuevos profesionales, y que se convierta en el libro de consulta y referencia para los profesionales en ejercicio.

El editor,

Juan Fernando Arango Londoño

Ingeniero Civil y Especialista en Estructuras.

Doctor por la Universidad del País Vasco (UPV/EHU).

Algunas entidades y organizaciones relacionadas con el concreto

Las siguientes son las entidades y organizaciones nacionales e internacionales que tienen relación con el concreto, muchas de ellas fueron consultadas y referenciadas en la elaboración de esta obra.

ACI

American Concrete Institute
www.concrete.org

AIS

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica
www.en-obra.com

ASTM

American Society for Testing and Materials
www.astm.org

BCA

British Cement Association
www.cementindustry.co.uk

CEB

Comité Euro Internacional du Béton
www.fib-international.org

CRD

Corps of Engineers, U.S.
www.usace.army.mil

ICONTEC

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y
Certificación.
www.icontec.org

ICPC

Instituto Colombiano de Productores de
Cemento
www.icpc.org.co

IMCYC

Instituto Mexicano del Concreto y del
Cemento
www.imcyc.com

NRMCA

National Ready Mixed Concrete Association
www.nrmca.org

PCA

Portland Cement Association
www.cement.org

RILEM

International Union of Testing and Research
Laboratories for Materials and Structures
www.rilem.org

USBR

US Bureau of Reclamation
www.usbr.gov

Contenido

1	Introducción al concreto	23
1.1	Alcance	23
1.2	Definiciones básicas	23
1.3	Composición aproximada del concreto	24
1.4	Funciones de los componentes	24
1.4.1	Pasta	24
1.4.2	Agregados	24
1.5	Ventajas del concreto	24
1.6	Reseña histórica	25
1.7	Propiedades	27
1.8	Clasificación del concreto	29
1.8.1	Clasificación por consistencia o trabajabilidad	29
1.8.2	Clasificación por resistencia	29
1.8.3	Clasificación por peso volumétrico	30
1.8.4	Clasificación por tipo de refuerzo	30
1.9	Referencias y bibliografía recomendada	30
2	Cemento Hidráulico	31
2.1	Materias primas	31
2.2	Fabricación	32
2.2.1	Extracción y transporte de materias primas	33
2.2.2	Trituración de materias primas	33
2.2.3	Molienda de crudo	33
2.2.4	Homogenización del crudo	34
2.2.5	Fase Clínker	34
2.2.6	Enfriamiento del Clínker	35
2.2.7	Molienda del cemento	35
2.2.8	Empaque y distribución	36
2.3	Composición química del cemento	37
2.3.1	Compuestos principales	37
2.3.2	Compuestos menores o minoritarios	38
2.4	Materiales cementantes suplementarios o adiciones	38
2.4.1	Puzolanas naturales	38
2.4.2	Puzolanas artificiales	38
2.4.3	Puzolanas mixtas - Metacaolín	40
2.4.4	Caliza finamente molida	40
2.4.5	Razones para el uso de adiciones.	41
2.5	Tipos de cemento	41
2.5.1	Cementos Pórtland	42
2.5.2	Cementos mezclados	42
2.5.3	Cementos hidráulicos por desempeño	43
2.5.4	Cemento blanco	44
2.5.5	Otros cementos	44
2.6	Propiedades del cemento	48

2.6.1	Hidratación	48
2.6.2	Calor de hidratación	51
2.6.3	Densidad	52
2.6.4	Densidad suelta	52
2.6.5	Superficie específica o finura	53
2.6.6	Consistencia normal	54
2.6.7	Tiempos de fraguado	55
2.6.8	Sanidad (estabilidad de volumen)	56
2.6.9.	Tonalidad del cemento	57
2.6.10.	Resistencia	57
2.7	Calidad del cemento	60
2.7.1	Norma INVÍAS	60
2.7.2	Norma colombiana de diseño sísmico de puentes	60
2.7.3	Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR - 10	60
2.7.4	Normas por prescripción y normas por desempeño	61
2.8	Referencias y bibliografía recomendada	62
3	Agregados	63
3.1	Qué son los agregados	63
3.2	Clasificación	64
3.2.1	Clasificación según su origen o procedencia	64
3.2.2	Clasificación por tamaño	65
3.2.3	Clasificación por densidad	66
3.3	Funciones	66
3.3.1	Trabajabilidad	66
3.3.2	Economía (relleno)	66
3.3.3	Mitigación de fisuras	66
3.3.4	Resistencia	66
3.3.5	Densidad	66
3.3.6	Durabilidad	66
3.3.7	Estética - concretos arquitectónicos	66
3.4	Propiedades de los agregados	67
3.4.1	Granulometría	67
3.4.2	Forma y textura superficial de los agregados	73
3.4.3	Porosidad	74
3.4.4	Densidad	75
3.4.5	Absorción y humedad	75
3.4.6	Efecto de hinchamiento de la arena	76
3.4.7	Masas unitarias (MU)	77
3.4.8	Resistencia a la compresión	78
3.4.9	Resistencia a la abrasión	78
3.4.10	Resistencia al impacto o tenacidad	79
3.4.11	Propiedades químicas	79
3.4.12	Sanidad del agregado	81
3.5	Sustancias perjudiciales	81
3.5.1	Materiales finos	81
3.5.2	Impurezas orgánicas	82
3.5.3	Contaminación salina	82
3.5.4	Partículas inestables	83
3.6	Referencias y bibliografía recomendada	84
4	Agua	85
4.1	Agua de mezclado	85
4.1.1	Influencia en el concreto	85
4.1.2	Calidad	86

4.2	Agua de curado	86
4.2.1	Influencia en el concreto	87
4.2.2	Calidad	87
4.3	Agua de lavado de los agregados	88
4.4	Normas de calidad del agua	88
4.4.1	Norma NSR - 10	88
4.4.2	Norma INVÍAS	89
4.5	Referencias y bibliografía recomendada	90
5	Aire	91
5.1	Aire atrapado	91
5.2	Aire incluido o incorporado	92
5.2.1	Manejabilidad	92
5.2.2	Resistencia	92
5.2.3	Mitigación de la segregación y la exudación	93
5.2.4	Durabilidad	93
5.3	Factores que afectan el contenido del aire	94
5.3.1	Tamaño máximo (TM) y cemento	94
5.3.2	Arena	94
5.3.3	Asentamiento y vibración	94
5.3.4	Temperatura del concreto	95
5.3.5	Mezclado	95
5.3.6	Terminado prematuro	95
5.3.7	Aditivos y agentes colorantes	95
5.3.8	Materiales cementantes suplementarios	96
5.3.9	Aditivo incorporador de aire	96
5.4	Medida del contenido de aire	96
5.5	Recomendaciones para el escogimiento del contenido de aire	97
5.6	Referencias y bibliografía recomendada	97
6	Aditivos para el concreto	99
6.1	Tipos de aditivos	100
6.1.1	Aditivos reductores de agua y de control de fraguado	100
6.1.2	Aditivos incorporadores de aire	103
6.1.3	Otros aditivos	104
6.2	Control de calidad	105
6.2.1	NSR - 10	105
6.2.2	Norma INVÍAS	105
6.3	Recomendaciones generales para el uso de aditivos	106
6.4	Referencias y bibliografía recomendada	106
7	Propiedades del concreto	107
7.1	Concreto fresco	107
7.1.1	Manejabilidad	107
7.1.2	Segregación	112
7.1.3	Exudación	113
7.2	Tiempo de fraguado	114
7.3	Concreto endurecido	115
7.3.1	Resistencia	116
7.3.2	Durabilidad	124
7.3.3	Densidad	133
7.3.4	Otras propiedades	133
7.4	Referencias y bibliografía recomendada	133
8	Diseño y proporcionamiento de mezclas normales	135
8.1	Elección de las propiedades de la mezcla y datos requeridos para el diseño	136
8.1.1	Selección de las propiedades de la mezcla	136

8.1.2	Datos requeridos para el diseño	136
8.2	Métodos sugeridos de dosificación	136
8.2.1	Método basado en el ACI 211.1	137
8.2.2	Método de la Road Note Laboratory - RNL	146
8.2.3	Dosificación de mezclas de concreto según los criterios de la NSR - 10	148
8.3	Ejemplos de aplicación	150
8.3.1	Ejemplo 8.1	150
8.3.2	Ejemplo 8.2	154
8.4	Referencias y bibliografía recomendada	156
9	Concretos con propiedades especiales	157
9.1	Concreto de alto desempeño	157
9.1.1	Materiales usados	157
9.1.2	Dosificación	158
9.1.3	Mezclado, colocación y curado	159
9.1.4	Propiedades	159
9.2	Concreto autocompactante	160
9.2.1	Ventajas del uso de concreto autocompactante	160
9.2.2	Aplicaciones	161
9.2.3	Aspectos de diseño, producción y colocación	161
9.2.4	Métodos de prueba	161
9.3	Concreto compactado con rodillo - CCR	162
9.3.1	Características generales de la mezcla	162
9.3.2	Aplicaciones	163
9.3.3	Materiales requeridos para la producción de CCR	163
9.3.4	CCR en Colombia	164
9.4	Concreto Tremie	164
9.4.1	Características generales del sistema	164
9.4.2	Características generales de la mezcla	165
9.4.3	Características generales de los materiales	165
9.4.4	Recomendaciones para la operación	166
9.5	Concreto bombeado	166
9.5.1	Características generales de la mezcla	166
9.5.2	Ventajas del concreto bombeado	167
9.6	Concreto permeable o poroso	167
9.6.1	Ventajas del uso concretos permeables	168
9.6.2	Aplicaciones	168
9.6.3	Características de la mezcla	168
9.6.4	Aspectos de diseño	168
9.7	Concreto lanzado	169
9.7.1	Características de la mezcla	169
9.7.2	Características de los materiales	170
9.7.3	Aplicaciones	171
9.8	Concreto liviano	171
9.9	Concreto de alta densidad o pesado	171
9.9.1	Características de la mezcla	171
9.9.2	Características de los materiales	172
9.9.3	Recomendaciones para dosificación y mezclado	173
9.10	Concreto de contracción compensada	173
9.11	Concreto masivo	173
9.11.1	Características de la mezcla	174
9.11.2	Características de los materiales	174
9.11.3	Recomendaciones adicionales para mitigar el aumento de temperatura interna	175

9.12	Concreto de color	175
9.12.1	Concreto coloreado con pigmentos	175
9.12.2	Concreto coloreado por los agregados	265 176
9.12.3	Concreto blanco o claro	177
9.13	Concreto con agregado precolocado	177
9.14	Concreto de impresión 3D	178
9.14.1	Características generales del sistema	178
9.14.2	Características de la mezcla	178
9.15	Referencias y bibliografía recomendada	179
10	Concreto con agregado liviano	181
10.1	Generalidades	182
10.2	Agregados livianos estructurales	182
10.2.1	Clasificación	182
10.2.2	Producción de los agregados	182
10.2.3	Propiedades del agregado liviano	183
10.3	Propiedades del concreto liviano estructural	186
10.3.1	Resistencia a la compresión	186
10.3.2	Densidad	186
10.3.3	Concreto con densidad especificada	187
10.3.4	Módulo de elasticidad	187
10.3.5	Contracción por secado	187
10.3.6	Resistencia a la tracción	188
10.3.7	Módulo de rotura	188
10.3.8	Durabilidad	188
10.3.9	Absorción de agua en el concreto liviano	189
10.3.10	Resistencia al fuego	189
10.3.11	Resistencia al desgaste	190
10.3.12	Reacción álcalis – sílice	191
10.4	Criterios de dosificación del concreto liviano	191
10.4.1	Criterios para el proporcionamiento	191
10.4.2	Materiales	192
10.4.3	Dosificación y ajuste de mezclas	192
10.5	Mezclado y transporte	194
10.6	Colocación	194
10.7	Control de calidad	194
10.8	Concretos livianos aislantes y de resistencia moderada	195
10.8.1	Definiciones y clasificación	195
10.8.2	Resistencia	196
10.8.3	Pautas para el proporcionamiento, mezclado y colocación	196
10.8.4	Protección acústica	196
10.8.5	Conductividad térmica	197
10.9	Referencias y bibliografía recomendada	197
11	Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto	199
11.1	Manejo y almacenamiento de los materiales	199
11.1.1	El cemento	199
11.1.2	Los agregados	192
11.1.3	Los aditivos	203
11.1.4	Los cementantes complementarios	203
11.1.5	El agua	203
11.2	Plantas de producción	204
11.2.1	Planta tipo horizontal	204
11.2.2	Planta tipo radial o estrella	205
11.2.3	Planta tipo torre	206

11.2.4	Camiones productores	206
11.3	Dosificación	206
11.3.1	Equipo de medición	207
11.3.2	Tolerancias de medición	207
11.3.3	Plantas dosificadoras	208
11.3.4	Alimentación a los sistemas de dosificación	208
11.4	Mezclado	208
11.4.1	Tipos de mezcladoras	209
11.4.2	Capacidad y mantenimiento de las mezcladoras	210
11.4.3	Orden de ingreso de los materiales a la mezcladora	210
11.4.4	Tiempo de mezclado	211
11.4.5	Otros sistemas de mezclado	211
11.5	Transporte, manejo y colocación del concreto	212
11.5.1	Camión mezclador (Mixer)	213
11.5.2	Volquetas	213
11.5.3	Vagonetas	214
11.5.4	Torres grúas o plumas	214
11.5.5	Bombeo	215
11.5.6	Bandas transportadoras	216
11.5.7	Carretillas y carros motorizados (buggy)	217
11.5.8	Canales, canaletas o canalones	218
11.5.9	Tubo embudo Tremie	220
11.5.10	Actividades previas a la colocación (vaciado)	220
11.5.11	Verificaciones previas al vaciado	222
11.5.12	Temperatura de la mezcla	224
11.5.13	Control de la colocación	224
11.6	Vibración, compactación o consolidación del concreto	225
11.6.1	Compactación manual	225
11.6.2	Compactación por vibración	227
11.7	Terminado o acabado del concreto	231
11.7.1	Acabado de superficies sin encofrado	231
11.7.2	Acabado de superficies con formaleta	233
11.8	Referencias y bibliografía recomendada	234
12	Curado del concreto	237
12.1	Fundamentos e importancia del curado	237
12.2	Factores para un buen curado	238
12.2.1	Contenido adecuado de humedad	238
12.2.2	Temperatura apropiada	239
12.3	Normativa	240
12.3.1	Curado no acelerado	240
12.3.2	Curado acelerado	240
12.4	Métodos y materiales para el curado	240
12.4.1	Tratamientos húmedos externos	240
12.4.2	Curado interno	244
12.4.3	Métodos para evitar la pérdida de humedad	245
12.5	Métodos que ayudan al curado	247
12.5.1	Barreras de viento y sol	247
12.5.2	Retardantes de evaporación	247
12.5.3	Selladores o sellantes	247
12.6	Otros métodos de curado	247
12.7	Referencias y bibliografía recomendada	248
13	Control de calidad del concreto	249
13.1	Definición de control de calidad	249
13.2	Normativa aplicable	249

13.2.1	Base de la normativa colombiana	249
13.2.2	Normativa colombiana	250
13.3	Práctica del control de calidad	251
13.3.1	Control al concreto fresco	251
13.3.2	Control al concreto endurecido	252
13.4	Referencias y bibliografía recomendada	264
Anexo		265

Introducción

La tendencia actual de la ingeniería es exigir cada vez más a los materiales en un mundo competido y globalizado. En general, se pide que además de cumplir con las propiedades técnicas a un bajo costo, demuestren un balance favorable en su ciclo de vida, tengan beneficios ecológicos, que sean durables, versátiles y funcionales. Desde estos puntos de vista, el concreto tiene un presente y un futuro brillante, haciendo que sea el material de construcción más utilizado en el mundo y, de cara al futuro, no haya uno que tienda a reemplazarlo.

El concreto ha llegado a convertirse en un material fundamental para el hombre, encontrándose en todas las estructuras donde desarrolla su vida diaria y haciendo parte de su entorno: vivienda, vías (carreteras, puentes), oficinas (edificios), escuelas, centros comerciales, reservorios de agua para generar energía o para consumo, tanques y silos, entre muchas aplicaciones. Por esto, hoy se ha llegado a asegurar que después del agua, el concreto es el material más usado por el hombre.

Lo anterior sugiere que en las escuelas formadoras de ingenieros civiles, se haga especial énfasis en el estudio del concreto en la cátedra de materiales. Pero también está suficientemente demostrado en el campo de la arquitectura, que el concreto ofrece infinitas posibilidades de formas, texturas y colores, conformando ambientes con magníficas obras que lo hacen un material con ideas ilimitadas.

Por las razones anotadas, **CORONA** y **CONSTRUCTORA CONCRETO**, decidieron emprender el presente documento, sin más pretensión que hacer un aporte a la ingeniería y un reconocimiento a este noble material.

Por su profundidad, la obra no pretende abarcar todo el tema del concreto; no obstante, intenta reseñar de manera concisa, práctica y didáctica sus aspectos fundamentales, complementándolo con una selección de referencias bibliográficas, donde se puede ahondar en temas particulares. Se tratan temas y materiales novedosos en el país, como el uso del metacaolín (Fortacret®) como cementante complementario (puzolana) de alto desempeño y, en especial, la tecnología de los concretos livianos, que ya son una realidad en Colombia.

En general, el texto está dirigido a todos los profesionales involucrados en la industria de la construcción, desde la formación de estudiantes de ingeniería civil, arquitectura, ingeniería de materiales y técnicos de la construcción, y como documento base de consulta para especificadores y personal de obra.



1 Introducción al concreto

El **concreto** es una mezcla compuesta de agregados, material cementante, agua, aire y algunas veces aditivos, que cuando se encuentra en estado fresco (plástico), admite cualquier forma y, en estado endurecido, resiste esfuerzos mecánicos y es durable frente a diversas acciones.

1.1 Alcance

En este capítulo, como su nombre lo sugiere, se presentan algunas generalidades fundamentales para el comienzo del estudio de la tecnología del concreto. Buena parte de los temas tratados apenas se esbozan, pero se estudiarán con mayor detalle en los diferentes capítulos.

Específicamente, se presentan las definiciones básicas primordiales, algunas de las funciones que cumplen los componentes dentro de la mezcla, y las ventajas del concreto frente a otros materiales. También se hace un breve recuento histórico, una inducción a las características principales del material, y se clasifica desde diferentes puntos de vista.

1.2 Definiciones básicas

El concreto es considerado por la Real Academia de la Lengua como un término que viene del inglés *concrete*, y lo refiere al hormigón, definiéndolo como: "Material que resulta de la mezcla de agua, arena, grava y cemento o cal, y que al fraguar, adquiere más resistencia". En Colombia fue adoptado el término "concreto", y en general en Latinoamérica, básicamente por la influencia de los textos norteamericanos.

El concreto se puede considerar como una roca artificial elaborada por el hombre, que aprovecha sus propiedades de resistencia y durabilidad en la construcción.

El material cementante es generalmente el cemento hidráulico, que desarrolla sus propiedades en presencia de agua y tiene como finalidad principal la de unir los

agregados, y las puzolanas cuando estas se encuentran presentes en la mezcla. El aire puede ser atrapado naturalmente, pero también ser incluido en forma controlada para ciertos propósitos especiales. En general, los agregados están conformados por una parte fina (arena) y una gruesa (grava), cuya finalidad principal es la de servir de relleno. Los aditivos son sustancias diferentes a los otros elementos (agregados, agua y cementantes) que se agregan a la mezcla para darle propiedades especiales.

Cuando el concreto se encuentra en estado fresco es dócil, permitiéndole dar la forma deseada (vigas, columnas, losas, entre otras); el grado de docilidad de la mezcla se denomina "manejabilidad" o "trabajabilidad", siendo la propiedad más importante del concreto en estado plástico. Con el tiempo, la mezcla se convierte en una masa endurecida resistente a los esfuerzos mecánicos, en especial a los de compresión, y durable frente a ciertas acciones.

La pasta de cemento se denomina a la mezcla de materiales cementantes, agua, aire (naturalmente atrapado o introducido intencionalmente) y aditivos (cuando son utilizados). Constituye entre el 25% y el 41% del volumen del

concreto. La lechada de cemento es la mezcla de cemento más agua y, eventualmente, aditivos, en donde la participación de agua es notoria, a tal punto que puede decirse que es una pasta muy diluida. El mortero es el nombre que se le da a la mezcla de pasta y arena. Como tal es usado en la pega de ladrillo, afinado de pisos y pañetes o revoques.

En el concreto, la manejabilidad o trabajabilidad hace referencia al grado de facilidad o dificultad de

una mezcla de concreto en estado fresco, para ser mezclada, manejada, transportada, colocada, compactada y terminada, sin que pierda su homogeneidad.

1.3 Composición aproximada del concreto

La Tabla 1.1 muestra, en términos generales, cómo participa cada componente en el volumen del concreto, con aire atrapado naturalmente, e incluido intencionalmente.

Tabla 1.1. Porcentaje aproximado de los constituyentes del concreto, en volumen

Con aire atrapado naturalmente (%)	Componente	Con aire incluido intencionalmente (%)
0,5 a 3	Pasta de cemento	Aire
7 a 15		Cemento
16 a 21		Agua
25 a 30	Agregados	Arena o agregado fino
25 a 50		Grava o agregado grueso

1.4 Funciones de los componentes

1.4.1 Pasta

Es el medio cementante encargado de pegar los agregados, formando una piedra artificial, cuyas propiedades son aprovechadas en la construcción.

En estado fresco, lubrica la mezcla proporcionándole fluidez e influye de modo determinante en la trabajabilidad. Por contener el cemento, es la responsable del fraguado y el desarrollo de la resistencia. Antes de producirse el fraguado, es posible realizar los procesos de transporte, colocación, moldeo, compactación y acabado del concreto en obra. En estado sólido, ocupa los espacios entre los agregados disminuyendo, de esta forma, la permeabilidad. También aporta a la durabilidad frente a distintas acciones agresivas como ambientes salinos, aguas y suelos con presencia de sulfatos. Constituye el medio alcalino protector del acero embebido.

1.4.2 Agregados

Son los materiales de relleno para hacer más económica la mezcla. Mitigan la formación de grietas durante el proceso de fraguado. Junto con la pasta y el proceso de hidratación, permiten el desarrollo de la resistencia con la edad.

Pasta de cemento: es la mezcla de materiales cementantes, agua, aire (naturalmente atrapado o introducido intencionalmente) y aditivos (cuando son utilizados). Constituye entre el 25% y el 41% del volumen del concreto.

1.5 Ventajas del concreto

El concreto cuenta con una serie de ventajas sobre otros materiales, haciendo que sea el material de construcción por excelencia. Entre otras se encuentran:

- Los materiales empleados para su elaboración se encuentran, prácticamente, en todas partes del mundo.
- La plasticidad en estado fresco, permite su moldeo para dar la forma deseada. También permite obtener variadas superficies de acabado exterior.
- Puede aumentar la resistencia con la edad, al contrario de otros materiales.
- Fragua y adquiere resistencia en casi todas las temperaturas, incluso debajo del agua.

- Es durable frente a diversas condiciones ambientales, además resistente al desgaste y a la acción de algunos químicos.
- Por su naturaleza es resistente al fuego y al envejecimiento. Es económico, comparado con otros materiales.
- Por su versatilidad, es posible utilizarlo en cualquier tipo de obra, permitiendo fabricar piezas continuas, prácticamente de cualquier formato.

1.6 Reseña histórica

Sin lugar a dudas, puede afirmarse que el origen del concreto va muy ligado a la historia de la humanidad y al uso de materiales cementantes, remontándose a épocas en las que el hombre sintió la necesidad de protegerse, usando rocas pegadas con arcilla.

Göbekli Tepe, ubicado en el sudeste de Turquía, fue un lugar de culto religioso que data del siglo X a.C (cerca de 12.000 años). Durante las excavaciones hechas en 1994, se descubrió que los pisos de las habitaciones estaban hechos de terrazo (cal pulida), convirtiéndose en el material cementante más antiguo descubierto hasta ahora.

El primer concreto conocido data de aproximadamente el año 7.000 a.C., descubierto durante la construcción de una carretera en Galilea (Israel). Fue el hallazgo de una caliza calcinada, mezclada con agua y piedra, que al endurecer formó el concreto. Así mismo, en el año 5.600 a.C, en una villa de cazadores y pescadores en los bancos del río Danubio, territorios de la antigua Yugoslavia, se encontró que los pisos de las chozas eran en concreto, conformado por la mezcla de una cal roja, arena, piedra y agua.

Otra importante y antigua cultura que usó el concreto fue la egipcia, hacia el año 1900 a.C. Emplearon yeso calcinado como material cementante, dejando vestigios en buena parte de sus monumentos y edificaciones.

También plasmaron mediante pinturas cómo elaboraban las mezclas.

Los griegos, en el año 500 a.C, usaron morteros con cal como material cementante para pañetar los muros. Basados en esta técnica, los romanos copiaron y desarrollaron la fabricación de concreto. Hacia el año 300 a.C extrajeron ceniza volcánica de una fuente cercana a la ciudad de Pozzuoli, confundiéndola con arena, y que mezclada con cal y agua, formaba un material cementante mucho más resistente y durable que cualquier otro. Este producto fue conocido como Cemento Puzolánico, y con el que se construyeron obras que aun hoy se pueden visitar. Tal es el caso del teatro de Pompeii (75 A.C.), el Circo Romano, el Panteón, el Coliseo y gran cantidad de acueductos a lo largo de Europa, entre otras. El inesperado y revolucionario hallazgo de los Romanos, hoy es la base de los cementos hidráulicos, como se estudia en el Capítulo 2.

Pero los romanos fueron más allá, pues su preocupación por los grandes espesores que resultaban de utilizar el concreto en los muros y otras estructuras, intentaron reforzarlo con varillas de bronce, pero sin éxito, debido a la diferencia en la dilatación térmica, que no permite un trabajo conjunto entre los dos materiales. Como si fuera poco, desarrollaron el concreto liviano con el uso de agregados menos pesados, como la piedra pómez. Con este material construyeron la Cúpula del Panteón, que es un ícono del concreto liviano de la antigüedad, tal como se muestra en la Figura 1.1.



Figura 1.1. Panteón Romano, construido en el año 127 a.C. con concreto liviano ✧

El seguimiento al desarrollo del concreto a través de la historia puede hacerse con los Sajones y Normandos, siendo los últimos quienes reintrodujeron el material a la Gran Bretaña, donde diseñaron y construyeron la primera mezcladora de concreto hacia el año 700 d.C. La caliza como agregado y cal calcinada como aglomerante, fueron los ingredientes básicos de los concretos para la construcción de castillos, iglesias, torres y puentes, que actualmente subsisten. Durante la época medieval, el concreto fue usado ocasionalmente y tuvo poco desarrollo técnico, pues en buena medida, el interés estaba puesto en el renacimiento de las artes.

Hacia el año de 1756, el ingeniero John Smeaton (denominado como padre la ingeniería civil en Inglaterra), fue comisionado para construir el Faro de Eddystone. Ya se había hecho en madera en dos ocasiones, quemándose el primero y arrasado por un vendaval el segundo. Para realizarlo en piedra, Smeaton investigó las propiedades de los morteros como medio de pega, encontrando que la cal hidráulica con alto contenido de arcilla, era el mejor material que soportaba la acción y el embate continuo del agua, dando origen así al primer cemento de calidad desde la época de los romanos.

El Cemento Pórtland fue obra del ladrillero Joseph Aspdin, de Leeds (Inglaterra), quien encontró que mezclando y calcinando 3 partes de piedra caliza con 1 de arcilla, moliendo y pulverizando este producto, resultaba un aglomerante, que al fraguar y endurecer, adquiría el color y las características de

la piedra natural localizada en Pórtland, razón por la que lo patentó en 1824, como "Cemento Pórtland".

El desarrollo industrial del cemento fue posible con la invención del horno rotatorio para la calcinación, y del molino para su pulverización, procesos que permitieron producir el material a menor costo y en forma masiva. Al comienzo del nuevo siglo (1900), vinieron investigadores como Abrams, Vicat y Le Chatelier, que con los resultados de su experimentación le dieron un impulso tecnológico y científico, sentando las bases para lo que hoy es el material de construcción más usado en el mundo.

Dos hechos marcaron grandes avances en los inicios de la tecnología: el uso de la relación agua/cemento enunciada por Abrams en 1918, como parámetro para estimar la resistencia; y la inclusión de aire a principios de los 40, para incrementar la durabilidad.

Así mismo, el esfuerzo y enorme adelanto de la tecnología de los aditivos, le dio al material infinitas posibilidades permitiendo desarrollar concretos con mayor resistencia y más manejables, de mejor desempeño y resistentes casi a cualquier medio, confirmándolo de esta manera, como el material de construcción por excelencia en el presente. Y, de cara al futuro, no se vislumbra un material que lo reemplace.



Figura 1.2. Puente Barrancabermeja-Yondó o Guillermo Gaviria Correa
Construido por Constructora Conconcreto. Premiado por entidades nacionales
(Cortesía Constructora Conconcreto)

1.7 Propiedades

El concreto tiene dos estados bien definidos: fresco y endurecido.

El **concreto fresco** se refiere básicamente al estado en que la mezcla tiene manejabilidad; es decir, al grado de facilidad para que pueda ser manejada, y transportada; colocándola y consolidándola por medios adecuados sin demasiados esfuerzos, y conservando la homogeneidad (segregue o exude).

La segregación consiste en la separación de las partículas gruesas de agregado de aquellas más finas. También, de las más a las menos densas, haciendo que pierda uniformidad el concreto. La exudación, o algunas veces llamada sangrado, aparece cuando una parte del agua que hay en la mezcla, tiende a colocarse en la superficie del concreto recién vaciado o durante el fraguado.

La manejabilidad se mide por medio del ensayo de asentamiento o Cono de Abrams (Figura 1.3). A mayor humedad, mayor consistencia y, por tanto, mayor asentamiento.

El **concreto endurecido** se refiere a una roca artificial elaborada por el hombre cuyas propiedades de resistencia, durabilidad, densidad, apariencia y demás características, son aprovechadas en la construcción.

De especial interés para la ingeniería están la resistencia a los esfuerzos mecánicos, particularmente los de compresión, y la durabilidad, como base para el desarrollo estructural.

Resistencia: es la capacidad que tiene el concreto de soportar esfuerzos de diferentes tipos y magnitudes. La resistencia a los esfuerzos mecánicos alude a los de compresión, tracción, flexión, cortante, abrasión y erosión, principalmente.

El concreto es muy resistente a los esfuerzos de compresión, haciendo que sea esta su propiedad más importante y con la que, por lo general, sea determinada su calidad.



Figura 1.3. Ensayo de Asentamiento o del Cono de Abrams para medir la trabajabilidad en un concreto liviano †

Comparado con su resistencia a la compresión, el concreto es un material con baja resistencia a los esfuerzos de tracción y corte. Para compensar esta deficiencia, la ingeniería recurre al acero como medio de refuerzo en aquellos sitios sometidos a tales esfuerzos, obteniéndose así, el concreto reforzado, un material muy resistente a los esfuerzos de compresión, tracción y cortante, base de la ingeniería estructural (Figura 1.4).



Figura 1.4. Construcción de una estructura de concreto reforzado resistente a esfuerzos de compresión, tracción y cortante †

En la resistencia a la compresión se acostumbran utilizar cilindros de 15 cm de diámetro, por 30 cm de altura (o de 10 cm por 20 cm), elaborados en condiciones estándar (Figura 1.5).



Figura 1.5. Medida de la resistencia a la compresión del concreto mediante probetas cilíndricas †

La **durabilidad** es la propiedad del concreto para resistir la acción del ambiente: ciclos de humedecimiento y secado, calentamiento y enfriamiento, hielo y deshielo, la erosión (estructuras hidráulicas) y la abrasión (losa de un pavimento de concreto). También hace referencia al ataque químico, por ejemplo por sulfatos, cloruros, ácidos, carbonatación, álcalis – agregado, entre otras.

Su aumento está dado por la elaboración de mezclas con bajos contenidos de agua para disminuir la permeabilidad (baja relación agua – cemento), el empleo de aditivos (plastificantes, inclusores de aire), uso de materiales cementantes suplementarios (puzolanas, escorias, metacaolín, cenizas) y de cementos especiales (resistentes a los sulfatos o a la reacción álcali sílice). Otra forma de proteger el concreto es recubriéndolo con materiales especiales para evitar el ataque. No controlar la durabilidad,



Figura 1.6. Ataque por sulfatos y cloruros †

es causar el deterioro prematuro en la estructura de concreto, tal como lo muestra la Figura 1.6.

La masa por unidad volumen del concreto, o **densidad**, es un componente importante del peso muerto de una estructura y debe tenerse en cuenta durante el diseño. En ocasiones constituye la propiedad más importante, puesto que puede requerirse para dar estabilidad a la estructura, como las presas de gravedad, macizos de anclaje, contrapesos para hundir tuberías; o en estructuras de aislamiento acústico, aislamiento de temperatura o protección contra radiación, entre otras.

La concepción de que el concreto es un material gris, sin vida y poco estético, ha cambiado. Aprovechando propiedades como la moldeabilidad de la mezcla en estado fresco, usando ciertos tamaños, colores y texturas de agregados, con la ayuda de formaleas, pigmentos, materiales y herramientas, es posible obtener concretos a la vista muy estéticos, que toman el nombre de “Concretos Arquitectónicos” (Figura 1.7). Con esto, el concreto ha evolucionado dando forma a ideas ilimitadas.



Figura 1.7. Formas, texturas y colores que puede tomar el concreto

En los estados fresco y endurecido, el concreto cambia de volumen. El primero obedece a la contracción que sufre la pasta durante el secado y por el paso a estado endurecido. Su mitigación es posible colocando una malla de acero o agregando fibras.

En estado endurecido puede haber cambio de volumen, básicamente, por efectos de la variación en la temperatura, la humedad y por la aplicación de cargas. El control por cambios de temperatura exige colocar juntas y mallas de acero; los cambios de volumen por humedecimiento y secado, es posible evitarlos elaborando mezclas con bajos contenidos de agua, o impermeabilizando la estructura.

El control de los cambios volumétricos en el concreto es importante para evitar la formación de grietas en la estructura y su consecuente deterioro. Así, la estabilidad de volumen se refiere al desplazamiento o flujo producido en el concreto sin la aplicación de fuerzas externas.

1.8 Clasificación del concreto

Las formas más comunes para clasificar el concreto, son: por consistencia (medida a través del Cono de Abrams), por resistencia a la compresión a 28 días de edad, por densidad y tipo de refuerzo. El capítulo de concretos especiales tratará con más detalle otras clasificaciones.

1.8.1 Clasificación por consistencia o trabajabilidad

La consistencia en la mezcla de concreto es una medida indirecta del grado de manejabilidad. La Tabla 1.2 muestra la clasificación desde este ángulo.

Tabla 1.2. Clasificación del concreto por consistencia

Asentamiento (cm)	Consistencia	Grado de trabajabilidad
0 a 2,0	Muy seca	Muy bajo
2,0 a 3,5	Seca	Bajo
3,5 a 5,0	Semi - seca	Bajo
5,0 a 10,0	Media	Medio
10,0 a 15,0	Húmeda	Alto

1.8.2 Clasificación por resistencia

Es tal vez la más utilizada. Se refiere a la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas a los 28 días de edad. Se pueden clasificar en tres tipos:

Concreto de baja resistencia o concreto pobre: aquel cuya resistencia a la compresión es menor a 14 MPa (140 kgf/cm², 2.000 psi). Es de resaltar que, el concreto estructural, no puede ser inferior a los 17 MPa (170 kgf/cm² o 2500 psi), según lo establecido por la NSR - 10.

Concreto de resistencia normal: aquel con una resistencia mayor o igual a los 14 MPa (140 kgf/cm², 2.000 psi) y menor a los 56 MPa (560 kgf/cm², 8.000 psi). Hay quienes consideran que el concreto de resistencia normal es de hasta 35 MPa (350 kgf/cm² o 5000 psi), pero con el desarrollo actual de la tecnología, una planta con adecuados controles puede producir concretos con resistencias de 56 MPa, de forma regular.

Concreto de alta resistencia: aquel con una resistencia mayor a los 56 MPa (560 kgf/cm², 8.000 psi). Los concretos con resistencias superiores a los 70 MPa (700 kgf/cm², 10.000 psi), son los denominados como de “Alto Desempeño”, pues con el aumento de la resistencia a la compresión, las otras propiedades son incrementadas. Los concretos de “Altas Prestaciones” se logran con aditivos reductores de agua de alto rango, y el empleo de materiales cementantes suplementarios como el metacaolín, las cenizas y la escoria de alto horno.

1.8.3 Clasificación por peso volumétrico

Desde el punto de vista del peso por unidad de volumen o peso volumétrico, aparecen tres tipos de concreto:

Concreto de peso liviano estructural: la NSR - 10, lo define como aquel cuya densidad de equilibrio está en un rango entre 1.440 y 1.840 kg/m³; elaborado con agregados livianos, como los resultantes de la arcilla expandida a través de calor (agregados termo expandidos).

De otra parte, es factible emplear el término **Concreto Celular**, elaborado con pasta de cemento y espuma, logrando un peso entre 400 kgf/m³ y 700 kgf/m³.

Concreto de peso normal: aquel, cuya densidad está entre los 2.000 kgf/m³ y 2.600 kgf/m³. Algunos autores consideran que el concreto de densidad normal (peso unitario), está entre los 2.200 kgf/m³ y los 2.400 kgf/m³, aunque para efectos prácticos, pueden asumirse como valores medios aceptables, el de 2.300 kgf/m³ para concreto sin refuerzo, y el de 2.400 kgf/m³ en concreto con acero de refuerzo.

Concreto de peso pesado: aquel cuya densidad es mayor a los 2.600 kgf/m³. Para su producción hay que emplear agregados muy densos, generalmente de origen industrial como el acero.

1.8.4 Clasificación por tipo de refuerzo

El refuerzo del concreto puede hacer referencia al acero o a las fibras. Desde este punto de vista, se pueden tener cuatro tipos de concreto:

Concreto simple, el que no dispone de ningún tipo de refuerzo. Concreto reforzado al que tiene acero de refuerzo para resistir cargas de tracción o cortante, o para mitigar la contracción por fraguado y temperatura. Concreto reforzado con fibra, al que precisa de algún tipo de fibra para mitigar la contracción por fraguado y por temperatura. Las fibras pueden ser sintéticas (polipropileno, nylon, polietileno, poli vinil alcohol - PVA), de acero y naturales (fique, coco, celulosa). Concreto pretensado o pre-esforzado son términos generales que hacen referencia, bien al concreto pretensado, o bien al concreto postensado. Concretos pretensados son aquellos elementos estructurales sometidos a esfuerzos de compresión, previos a la puesta en servicio, mediante cables de acero (torones), que son tensados antes de la colocación del concreto.

Concreto postensado son aquellos elementos estructurales sometidos a esfuerzos de compresión, previos a la puesta en servicio, mediante cables o barras de acero (torones) que son tensados luego de la colocación del concreto y una vez ha alcanzado su resistencia característica. Para este caso, los cables no están directamente en contacto con el concreto en el momento del vaciado (colocación del concreto), puesto que le transmitiría el esfuerzo de tracción por adherencia entre estos y el concreto, razón por la que el acero de tensado es colocado dentro de vainas de plástico o metal y que luego del tensado se rellenan con un mortero fluido sin contracción.

1.9 Referencias y bibliografía recomendada

- 1.1 CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. The History of Concrete. Londres C&CA, 1979.
- 1.2 MATALLANA R. Fundamentos de Concreto Aplicados a la Construcción. Bogotá, D.C. ICPC, 2007.
- 1.3 MEHTA K. Concrete, Structure, Properties and Materials. New Jersey. Prentice - Hall, Inc. 1986.
- 1.4 NEVILLE, A.M. Tecnología del Concreto. México D.F., IMCYC, 1999.
- 1.5 PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Illinois, PCA, 2004.
- 1.6 TROXELL, G., DAVIS, H. Y KELLY, J. Composition and Properties of Concrete. N.Y., Mc Graw-Hill, 1968.

2 Cemento hidráulico

Los cementantes entregan propiedades adhesivas y cohesivas, permitiendo unir los agregados y formar un material compacto, con resistencia y durabilidad.

En términos generales, el cemento puede definirse como un material con propiedades adhesivas y cohesivas, que le permiten unir los fragmentos minerales (agregados), para formar un material compacto con resistencia y durabilidad propia (concreto).

Esta definición incluye gran cantidad de materiales cementantes como la cal, el asfalto y el yeso, entre otros. No obstante, los cementos que más importan desde el punto de vista de la tecnología del concreto, son los cementos calcáreos con propiedades hidráulicas, es decir, que desarrollan sus propiedades en presencia de agua, en virtud a la reacción química que ocurre entre los dos materiales. En lo sucesivo, será usado el término cemento, para referirse al cemento hidráulico.

Cemento hidráulico: material que desarrolla sus propiedades adhesivas y cohesivas en presencia de agua, y que tiene la característica de formar materiales compactos, con resistencia y durabilidad.

Por naturaleza, es un componente químicamente activo, y por tanto, determinante en todas las características de la mezcla, como la resistencia y la durabilidad. Pero también puede reaccionar nocivamente con otros productos, atentando contra la durabilidad.

El cemento constituye entre el 7% y el 15% del volumen total en el concreto. La cuantía depende del tipo de cemento empleado y también de las propiedades que

se quieran lograr en el concreto. Normalmente, el cemento es el componente más costoso por unidad de peso en el concreto. Por ello, uno de los objetivos perseguidos en el diseño de mezclas es optimizar su cuantía, sin sacrificar las propiedades.

La industria cementera está en capacidad de ofrecer cementos con diferentes propiedades, obtenidos al efectuar variaciones durante su producción o mediante el uso de materias primas con características específicas.

2.1 Materias primas

El cemento está compuesto por dos materias primas básicas: calizas y arcillas. Las primeras suministran calcio y las segundas sílice y alúmina. Además contiene pequeñas cantidades de óxido de hierro, óxido de magnesio, álcalis y anhídrido sulfúrico. La marga es uno de los materiales más utilizados en la fabricación del cemento por sus características calcáreas y arcillosas. Las pizarras también son muy empleadas por su contenido en sílice y alúmina.

Los límites de composición aproximados para cementos portland se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Límites de composición aproximados para el cemento Pórtland (2.9)

Compuesto	Como óxido	Límites aproximados (%)
Cal	CaO	60 a 67
Sílice	SiO ₂	17 a 25
Alúmina	Al ₂ O ₃	3 a 8
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	0,5 a 6
Óxido de magnesio	MgO	0,5 a 4
Alcalis	Na ₂ O, K ₂ O	0,3 a 1,2
Anhídrido sulfúrico ^A	SO ₃	2 a 3,5

^A Trióxido de azufre

Las calizas y las arcillas son materiales abundantes en la naturaleza, pero como fue mencionado, deben tener propiedades especiales para que sean idóneas en la fabricación del cemento. Dependiendo de sus propiedades y del tipo de cemento deseado, la industria recurre a la dosificación de sus materias primas.

2.2 Fabricación

La instalación de una planta de cemento requiere de altas inversiones iniciales, por lo que su planeación se debe realizar minuciosamente, proyectándose para que permanezca por más de 20 años.

Existen básicamente dos procesos para la fabricación del cemento: vía seca y vía húmeda. El método

depende fundamentalmente de factores físicos y económicos. Los físicos se refieren al estado de las materias primas; como por ejemplo: la humedad de la arcilla, calidad de la caliza, entre otros. Los económicos se basan principalmente en la mayor o menor cantidad de combustible consumido en los diferentes procesos de elaboración y en la distancia de acarreo de las materias primas hasta la planta, entre otros. En la Figura 2.1 se presenta la panorámica de una planta y en la Figura 2.2 un esquema de las diferentes operaciones que involucra cada uno de los procesos.



Figura 2.1. Construcción de una planta de cemento de última generación
(Cortesía Empresa Colombiana de Cementos)

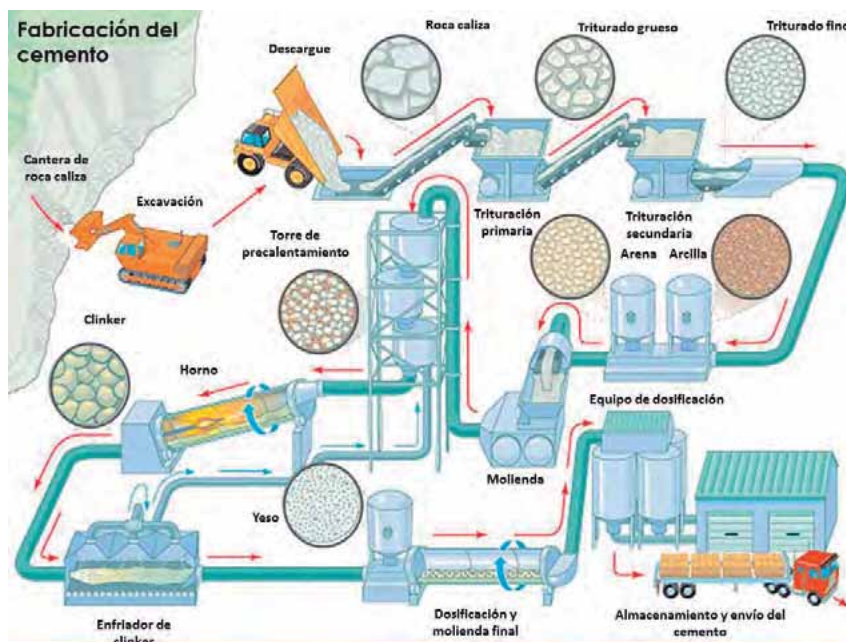


Figura 2.2. Esquema de fabricación del cemento: proceso seco
(Adaptada de theconstructor.org)*

2.2.1 Extracción y transporte de materias primas

La producción del cemento empieza con la extracción de las materias primas (caliza y arcilla), generalmente realizada por técnicas modernas de explotación en canteras a cielo abierto, cuyos procesos de minería legal implican la obtención de los títulos mineros y los correspondientes permisos ambientales.

El material extraído, luego de cargarse, es transportado en equipos pesados desde la cantera hasta la planta. En zonas montañosas, es muy común el transporte por cables aéreos o bandas transportadoras debidamente protegidas. En algunas plantas de proceso húmedo, el transporte se hace por tuberías que reciben el nombre de pastoductos, siendo necesario efectuar en la cantera procesos previos de trituración, molienda y adición de agua.

2.2.2 Trituración de materias primas

El proceso de fabricación propiamente dicho, inicia con la trituración de las calizas en la planta. La materia prima, compuesta por trozos de diferentes tamaños, alcanzando algunos un metro o más, es triturada en dos o tres etapas por equipos mandibulares o de impacto, hasta alcanzar fragmentos con tamaños aproximados

entre 5 y 10 mm. Se efectúa entonces la premezcla en las materias primas (calizas y arcillas), buscando que el cemento resultante alcance una calidad uniforme.

2.2.3 Molienda de crudo

En el caso del proceso por vía seca, la materia prima triturada sigue reduciendo su tamaño hasta alcanzar granos aproximados a 0,5 mm, en los denominados molinos de crudo, que pueden ser horizontales (de bolas) o verticales. Los molinos de bolas son grandes cilindros que giran sobre su eje longitudinal, cargados con bolas de acero que muelen el material por la acción combinada entre la fricción y el impacto. Los molinos verticales son grandes rodillos que giran sobre una mesa donde se tritura el material.

En el proceso por vía húmeda, la molienda de las materias primas ya dosificadas se forma con la adición de agua en un molino. El material resultante es un lodo llamado pasta y debe ser manejado y transportado a través de tuberías.

2.2.4 Homogeneización del crudo

La homogeneización del material que pasará al horno pretende que las partículas sean distribuidas en la masa, buscando una composición lo más uniforme posible.

El proceso por vía húmeda es realizado en grandes tanques llamados balsas, en los que, mediante agitación mecánica e inyección de aire en la base, impiden la segregación de la pasta. Luego, parte del agua que había sido agregada para facilitar las labores de molienda y transporte se extrae para evitar que entre muy húmeda al horno. Para ello, hay que sedimentar la pasta en grandes tanques, llamados espesadores, y retirar el agua por la parte superior.

En el proceso por vía seca, la dosificación está precedida por el secado de las materias primas. El polvo que sale del molino se llama harina, que será depositada en silos especiales, y homogeneizada por agitación con aire.

2.2.5 Fase Clíinker

Es tal vez la fase más importante del proceso, pues es allí donde ocurren las transformaciones fundamentales que dan origen al cemento y a sus propiedades de conglomerante hidráulico.

La calcinación se efectúa en hornos rotatorios, consistentes en grandes cilindros horizontales de acero, ligeramente inclinados, que giran lentamente alrededor de su eje, y recubiertos en su interior con ladrillos refractarios. Las dimensiones dependen del proceso empleado en la fabricación y la capacidad de producción: el diámetro varía entre los tres y los cinco metros y la longitud puede ser de 50 m o más,

en el proceso por vía seca (Ver Figura 2.3) y, en ocasiones, puede superar los 200 m, en el proceso por vía húmeda.

El crudo (la pasta o la harina), es depositado en el extremo superior y, mediante la rotación del horno y la acción de la gravedad, desciende con lentitud, pasando sucesivamente por zonas de mayor temperatura, hasta llegar a la zona final donde está la llama, alcanzando la máxima temperatura, unos 1.450 °C. La temperatura de la llama está entre 2.000 y 2.200 °C, lograda quemando carbón con alto poder calorífico, aunque algunos hornos están dotados para quemar gas o combustible fuel oil.

Por las altas temperaturas alcanzadas, el tiempo de permanencia de los gases y otras variables del horno, se propician las condiciones para realizar la disposición de materiales de deshecho considerados peligrosos, como la quema de llantas, aceites usados, cascarilla de arroz y tierras contaminadas con insecticidas, en lo que se ha denominado como coprocesamiento, técnica muy empleada hoy en el mundo, siendo Colombia uno de los países en donde se presta un servicio ambiental, mientras se aprovecha el poder calorífico de estos materiales sin alterar las propiedades del cemento resultante.

En los hornos de proceso seco, dado que no es necesario eliminar el agua en exceso que se tiene en la pasta del proceso húmedo,

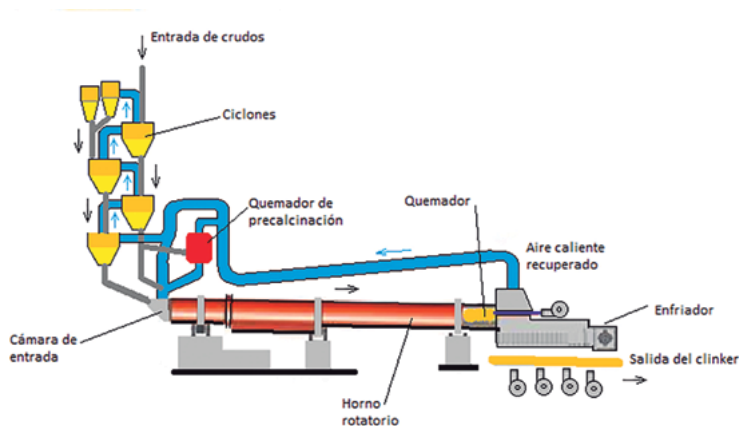


Figura 2.3. Esquema de un horno rotatorio de cemento de una planta vía seca*

Clínker: es un producto de forma granulada, con tamaños entre 5 y 65 mm, aproximadamente, formado a partir de la calcinación de caliza y arcilla a temperaturas que varían entre los 1.350 y 1.450°C. Luego, estos gránulos, pulverizados conjuntamente con otros materiales (adiciones), permiten fabricar los distintos tipos de cemento.

se emplea el aire caliente del horno para iniciar el calentamiento de las materias primas. Esto se realiza en las torres donde se ubican los precalentadores, justo antes del horno, con lo cual se reduce notablemente el consumo energético, que constituye uno de los mayores costos en la producción del cemento. Por esto, el proceso en seco requiere hornos más cortos. Esta es la

principal razón para que hoy las plantas de proceso húmedo ya no se construyan, y las que funcionan se estén convirtiendo a proceso seco.

En la parte final del horno y cuando se alcanzan los 1.450 °C, se produce la fusión de la materia prima, formándose gránulos de diferente tamaño alcanzando hasta los cinco centímetros de diámetro aproximadamente, que constituyen el Clínker (Figura 2.4). Sus propiedades son muy importantes, pues son las que le dan, en muy buena medida, el carácter al cemento resultante.



Figura 2.4. Partículas de Clínker †

2.2.6 Enfriamiento del Clínker

Cuando el Clínker está detrás de la llama empieza a perder temperatura iniciándose la etapa de enfriamiento, proceso que debe acelerarse con equipos especiales de diferente tipo, como los enfriadores de parrilla o los llamados tipo planetario.

El enfriamiento del Clínker consiste en bajar la temperatura con la que sale del horno (aproximadamente 200 °C) en un lapso que puede ser de una pocas horas (2 ó 3), para evitar la formación de óxido de magnesio cristalizado (periclasa), que le da carácter expansivo al cemento resultante.

2.2.7 Molienda del cemento

El Clínker salido del horno presenta dos inconvenientes: uno, el tamaño de sus partículas, pues para aprovechar el cemento con todo su poder conglomerante, es ne-

cesario que se encuentre como polvo fino, pues solo así puede efectuarse eficientemente la hidratación; y dos, si se mezcla con agua, fragua de inmediato, por lo que hay que colocarle un regulador de fraguado. Por estas dos razones, al Clínker hay que molerlo con yeso (entre 3% y 10%, dependiendo de su pureza), dándole así el tamaño o finura necesaria y permitirle un tiempo justo en el fraguado.

El proceso de molienda se realiza en molinos horizontales de bolas (Figura 2.5), o verticales (Figura 2.6), siendo este último el preferido actualmente por industria debido a su eficiencia y menor consumo energético.

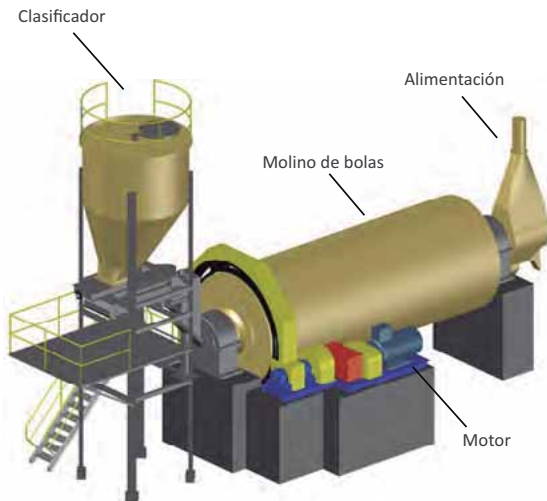


Figura 2.5. Esquema de un molino de bolas

Durante el proceso de molienda del Clinker, la industria cementera suele moler conjuntamente con el yeso otros materiales, denominados adiciones, que le proporcionan al producto características especiales.

El polvo fino así obtenido es el cemento, quedando listo para salir al mercado con diferentes nombres, dependiendo de las características con las cuales fue producido. Luego es almacenado por tipos, en silos de diferentes capacidades para su empaque y distribución.

2.2.8. Empaque y distribución

La distribución del cemento en el mercado generalmente se realiza mediante sacos, a granel o semi-granel (Figura 2.7). Los sacos son de papel compuestos generalmente de 2 ó 3 capas, dependiendo del tipo y distancia del transporte. El cargue a los planchones se realiza manual o en estibas de madera, y debe ir cubierto con carpa. Cada saco contiene 50 kg, aunque en algunas regiones la costumbre es usar sacos de 42,5 kg.

La distribución del cemento a granel se realiza a través de camiones cisterna (llamados "pipas"), que son cargados en la fábrica por gravedad y descargados al cliente en un silo con la ayuda de un compresor. La cantidad de cemento así transportado varía entre 28 y 30 toneladas aproximadamente.

En la exportación de Clinker o cemento, prima la utilización de barcos graneleros especiales, que generalmente son cargados a través de bandas transportadoras. Las cantidades normalmente despachadas pueden superar las 25.000 toneladas.

El semi-granel es un sistema poco frecuente, que utiliza bolsas con capacidad aproximada de 1,5 toneladas llamadas "Big Bags". El cargue en la fábrica es hecho por gravedad y su manejo cuenta con la ayuda de un montacargas.

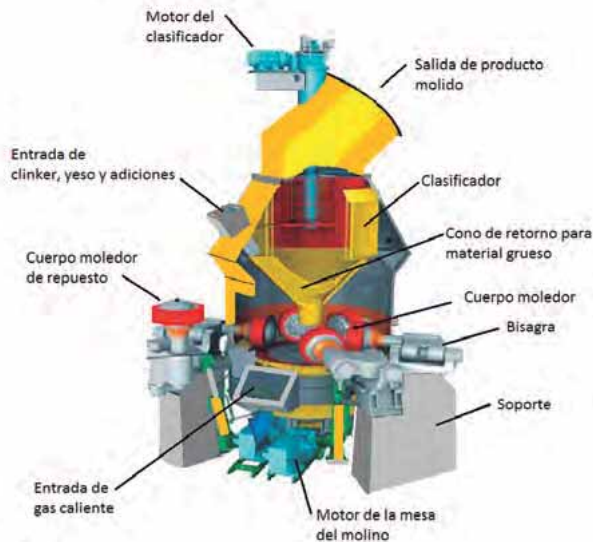


Figura 2.6. Esquema de un molino vertical adaptado de Gebs-Pfeiffer



Figura 2.7. Algunas formas de empaque y distribución del cemento

2.3 Composición química del cemento

2.3.1 Compuestos principales

Las materias primas usadas en la manufactura del cemento, interactúan en el horno hasta alcanzar un

estado de equilibrio químico durante la formación del Clínter, creando una serie de productos químicos más complejos (Tabla 2.2), que le dan en buena medida el carácter al cemento.

Tabla 2.2. Compuestos principales del cemento

Compuesto	Fórmula química	Abreviatura usada
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Estos componentes son considerados los compuestos principales del cemento. Generalmente la fórmula química de estos constituyentes está dada en forma abreviada, con el único fin de facilitar su expresión y utilizar un término más sencillo. La abreviatura se hace aprovechando que los compuestos están formados básicamente por óxidos, de modo que al óxido de calcio

(CaO) es denotado simplemente como C, al de aluminio como A, y así sucesivamente, colocándole como subíndice el número de moles en que participa cada óxido. Esta es la forma para llegar a la notación mostrada en la tercera columna de la Tabla 2.2.

2.3.2 Compuestos menores o minoritarios

Además de los compuestos principales dados en la Tabla 2.2, hay otros compuestos denominados menores, como el óxido de magnesio (MgO), óxido de titanio (TiO_2), manganeso (MnO_2), ozono (O_3) y los álcalis de potasio y de sodio (K_2O y Na_2O), que en porcentaje en el peso del cemento es poco. No obstante, algunos revisten importancia como los álcalis, debido a que pueden reaccionar con la sílice de algunos agregados y formar geles expansivos que deterioran el concreto, tal como está explicado en el capítulo de agregados.

2.4 Materiales cementantes suplementarios o adiciones

Las adiciones en el cemento son una práctica mundialmente conocida, cuyo uso se remonta a más de 2.000 años, cuando los romanos inventaron por casualidad el cemento puzolánico, resultado al mezclar ceniza volcánica (que confundieron con arena) con la cal (material cementante usado en aquella época) y el agua. Dado que el inesperado encuentro sucedió en la ciudad de Pozzuoli, los materiales tomaron el nombre genérico de “Puzolana”, como se conocen en la actualidad.

Las puzolanas son materiales de composición química parecida a la del Clínter (contienen sílice y alúmina), pero no son cementantes por sí solos. No obstante, cuando están finamente pulverizadas, a temperaturas ordinarias y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio (más conocida como Portlandita), o cal liberada naturalmente de la reacción cemento – agua, y forman productos cementantes estables.

Puzolanas o materiales cementantes suplementarios: también conocidos como adiciones, son productos no cementantes por sí solos, pero cuando actúan conjuntamente con el cemento y el agua, a temperaturas normales, reaccionan químicamente formando productos estables que sí son cementantes.

Las adiciones más usadas mundialmente en la industria del cemento son la escoria de alto horno y la caliza finamente molida. El metacaolín y el humo de sílice son dos materiales cementantes suplementarios muy importantes, que generalmente son



Figura 2.8. Algunas adiciones empleadas en el cemento †

añadidos directamente a la mezcla de concreto (Figura 2.8). Las puzolanas pueden ser naturales, artificiales o mixtas.

2.4.1 Puzolanas naturales

Las puzolanas naturales más comunes son las cenizas de origen volcánico: pumitas, pizarras y pedernales opalinos, entre otras. Existen también rocas de origen orgánico, como las tierras formadas por algas o esqueletos de animales (tierras diatomáceas o de infusorios), caracterizadas por su alta superficie específica (finura) y por su alto contenido de sílice, aunque suelen consumir mayor cantidad de agua en la mezcla por su estructura porosa y forma angular.

Es de anotar, que no todas las puzolanas tienen propiedades hidráulicas, es decir, que sean potencialmente cementantes. Para ello es necesario que la sílice sea amorfa (no cristalina), para que pueda reaccionar con la portlandita en presencia de humedad y forme productos cementantes. Cuando la sílice es cristalina tiene poca reactividad. El método para determinar la actividad puzolánica se relaciona en la NTC 1784.

2.4.2 Puzolanas artificiales

Se llaman puzolanas artificiales porque son productos industriales o sus residuos, que en virtud del proceso al que son sometidos, pueden alcanzar propiedades hidráulicas o puzolánicas. Entre otros materiales puzolánicos artificiales están la escoria de alto horno, el humo de sílice y la ceniza volante o ceniza puzolánica (fly ash).

Escorias de alto horno

Las escorias de alto horno o escorias siderúrgicas, son un subproducto proveniente del tratamiento de minerales de hierro en el alto horno, durante la manufactura del acero. Para que la escoria adquiera propiedades hidráulicas latentes (que reaccione químicamente con el hidróxido de calcio y se formen productos cementantes), es necesario someterla a un enfriamiento brusco una vez sale del horno, mediante un chorro de agua o de aire frío. Producto de esta reacción, la escoria se granula quedando en forma de arena suelta, de color amarillo claro y amorfa.

La escoria de alto horno se caracteriza porque tiene, en esencia, los mismos componentes químicos del cemento: cal, sílice y alúmina, que le dan una actividad química intrínseca y potencial de formar productos cementantes estables. En este caso, el hidróxido de calcio liberado, se convierte en un agente que da inicio a la reacción con la escoria.

Humo de sílice

El humo de sílice, también es conocido como microsílíce o microsílíce o *silica fume*. Este último fue adoptado por la ASTM y el ACI, para referirse al humo de sílice empleado en la producción del concreto. Es un material que raras veces es adicionado directamente al cemento, a tal punto que el ACI lo trata como un aditivo finamente dividido para elaborar concreto.

La microsílíce es un subproducto de la industria de las aleaciones férricas, como el ferro sílice. En términos simples, es el hollín que al final queda adherido a las mangas del filtro cuando los gases pasan por su conducto. Dada la extremada finura de los granos, no es fácil su manejo, aunque también puede encontrarse como lechada en proporción agua: microsílíce de 1:1, en peso.

Es un material muy rico en sílice amorfa, tiene un tamaño de partícula aproximadamente 100 veces más pequeño que el grano de cemento, es de forma esférica con una densidad de 2.200 kg/m³. Por sus características, el humo de sílice es utilizado en la producción de concretos de baja permeabilidad, altas resistencias y, en general, para los concretos denominados de alto desempeño.

El humo de sílice tiene un tamaño medio que ronda los 0,16 µm (partícula con rango entre 0,03 y 0,3 µm) y el contenido de sílice normalmente supera el 90% en peso. Aunque es altamente efectivo como material puzolánico, exige mayores contenidos de agua de mezcla-

do en el concreto, siendo necesario usar aditivos reductores de agua de alto rango. Generalmente el máximo contenido de humo de sílice no supera el 15% por peso del cemento.

Con el uso del humo de sílice, se pueden obtener concretos con resistencias aproximadas a los 120 MPa (1.200 kg/cm² o 18.000 psi). La alta finura hace que los espacios dejados por los granos de cemento hidratado, sean obturados por las partículas de microsílíce ya reaccionadas, generando reducciones importantes en la permeabilidad. Así mismo, los productos cementantes formados por la reacción entre la sílice amorfa y la cal, procedente de la hidratación de la pasta, son muy resistentes al ataque químico.

En Colombia no se produce microsílíce, siendo necesaria su importación con un alto costo. El uso se da en aplicaciones especiales para aumento de durabilidad y de resistencias mecánicas, principalmente.

Cascarilla de arroz calcinada

La cáscara del arroz es un desecho natural procedente de la trilla de su cereal, generando en muchas ocasiones problemas ambientales, pues su disposición suele hacerse mediante quema a cielo abierto incontroladamente.

Pero cuando la calcinación se hace controladamente, a temperaturas entre 500 °C y 700°C, se obtiene una ceniza amorfa con alto contenido de sílice, estructura porosa y con propiedades puzolánicas. Cuando este material se usa conjuntamente con el cemento, se formarían productos que contribuyen a las resistencias iniciales del concreto, en especial entre 1 y 3 días. No obstante, dada la alta finura y la estructura porosa de la cascarilla, es necesario el uso de aditivos superplastificantes, para proporcionar la manejabilidad requerida en las mezclas de concreto.

En Colombia hay experiencias en la disposición de la cascarilla de arroz en hornos de cemento, quedando las cenizas directamente incorporadas en el Clínter; no obstante, la dificultad del transporte de la cascarilla hasta la planta es el principal obstáculo, debido a su baja densidad.

Ceniza volante (*Fly Ash*)

Es una traducción de *fly ash*, como es conocida en inglés, o también como ceniza puzolánica. Generalmente su procedencia es la combustión del carbón en las centrales generadoras de energía térmica. Cuentan con una alta finura y son esféricas, ayudando a la manejabilidad del concreto.

Para que las cenizas puedan usarse como adición activa en el cemento, es importante tener en cuenta que el porcentaje de material no quemado o “inquemados”, debe ser inferior al 6% (medido a través de las pérdidas por ignición). Así mismo, la norma ASTM C618 fija que el contenido mínimo de sílice, alúmina y óxido férrico, debe ser como mínimo del 70%, el contenido máximo de SO₃ de 5%, y un contenido máximo de álcalis (Na₂O).

La ceniza, cuando es usada en cantidades relativamente grandes, puede afectar el color del cemento y, en consecuencia, del concreto, tendiendo a quedar oscuro.

La norma ASTM C618 clasifica la ceniza volante dependiendo del tipo de carbón y su procedencia. Cuando es un carbón bituminoso que tiene alto contenido de sílice, recibe el nombre de Ceniza Volante Clase F. Cuando es sub bituminoso, es decir, que contiene alta cantidad de calcio, es denominado Ceniza Volante Clase C. La Clase F tiene propiedades puzolánicas (necesita la cal producida por el cemento al hidratarse), mientras que la Clase C puede tener propiedades cementantes por sí sola (latentes).

2.4.3 Puzolanas mixtas - Metacaolín

Las puzolanas mixtas son materiales naturales, que al ser sometidas a temperaturas entre 550 °C y 1.100 °C, incrementan en gran medida su actividad puzolánica. Tal es caso de la arcilla caolinitica pura, que al ser sometida a temperaturas controladas entre 650 °C y 850 °C y molidas finamente a tamaños de partícula promedio entre 10 y 20 μm, logra su potencial puzolánico; este material es conocido como metacaolín, considerado como uno de los mejores materiales cementantes suplementarios, por las

características que le proporcionan al concreto. Entre otras se destacan:

- El notable incremento en las resistencias mecánicas, dado que forma productos cementantes estables.
- Por tener un tamaño de partícula menor a la del cemento, obtura sus espacios dejados, disminuyendo la permeabilidad y aumenta la densidad del concreto.
- La disminución del calor de hidratación y la consecuente contracción del concreto, mitiga la formación de fisuras.
- Posee alta resistencia a los sulfatos y atenúa efectivamente la reacción álcalis - sílice.

El metacaolín es un material rico en aluminio, virtud mediante la cual mitiga de forma efectiva el ataque por cloruros, toda vez que la alúmina amorfa y el cloro se combinan químicamente formando la llamada Sal de Friedel, evitando que el cloro llegue al acero e induzca su corrosión.

Al igual que el humo de sílice, es un material poco empleado como adición en la fabricación del cemento. Su uso suele hacerse directamente en la fabricación del concreto, en cuantías aproximadas entre 6% y 25%, por peso del cemento. Debido a su alta finura requiere el empleo de aditivos superplastificantes para un adecuado manejo del concreto fresco.

2.4.4 Caliza finamente molida

La caliza molida es un material que no tiene propiedades puzolánicas, pero por ser tan fino como el cemento y por sus propiedades físicas, tiene un efecto benéfico sobre algunas propiedades del concreto como una mayor trabajabilidad, aumento en la densidad y disminución de la permeabilidad y la exudación.

La cantidad de caliza finamente dividida está limitada por las normas Americanas (ASTM C150) y europeas (ENV 197-1) a un 5%, cuando se trata de cementos Pórtland.

En Colombia algunas empresas muelen caliza conjuntamente con el Clínter, en cuantías diferentes, algunas veces en combinación con otros materiales como puzolanas y escorias.

2.4.5 Razones para el uso de adiciones.

El empleo de adiciones en la industria cementera es una práctica mundial, fundamentada en razones técnicas, económicas y ambientales.

Razones técnicas

Se basan en la facilidad que tienen las puzolanas, para reaccionar químicamente con la cal liberada (hidróxido de calcio) por el cemento, durante su proceso de hidratación, formando productos cementantes estables con el tiempo, permanentes, insolubles en agua y resistentes a algunas exposiciones agresivas. Por su alta finura, los productos de reacción obturan los espacios dejados por el cemento, incrementando la densidad del concreto y haciéndolo menos permeable a los líquidos y los gases, característica clave para el desarrollo de concretos durables.

En general, las adiciones no manifiestan su actividad de forma inmediata, pues su proceso de hidratación se desarrolla lentamente. El calor de hidratación de los productos formados es menor que la del cemento, lo que disminuye el riesgo de agrietamiento al contraerse durante el fraguado. El desarrollo de la adquisición de resistencia es lenta a edades tempranas (las primeras 2 semanas), pero luego son altas especialmente después de 28 días. Sin embargo, hay materiales cementantes suplementarios que reaccionan muy rápidamente, desprendiendo mucho calor y logrando altas resistencias a edades tempranas, como es el caso de la microsílíce.

Dada la alta finura, las puzolanas que son redondeadas actúan como rodachines entre los agregados, haciendo que el concreto tenga una mayor manejabilidad en estado fresco, aunque demandan más agua de mezclado por la alta superficie específica.

Razones económicas

Normalmente el costo para conseguir las adiciones es menor que para producir Clínter, además su molienda es más fácil; estas dos razones son claves para sustituir parte del Clínter por adición.

Razones ambientales

En lo que respecta a las motivaciones ambientales, las adiciones en el cemento por lo general no requieren de un proceso industrial de manufactura adicional. Por el

contrario, algunas son desechos (como las cenizas), que las empresas generadoras necesitan disponerlos adecuadamente.

Por otra parte, el reemplazar Clínter por adición evita la emisión de CO₂ (por cada tonelada de producción de Clínter, se emite aproximadamente entre 0,5 y 0,7 t de CO₂) y otros gases al aire. Así mismo, se emplea menor cantidad de recursos naturales no renovables. Para producir 1 t de Clínter, se puede llegar a requerir hasta 3 t de recursos naturales no renovables.

2.5 Tipos de cemento

De acuerdo con lo expuesto, la industria cementera dispone de dos alternativas para la producción de diferentes tipos de cemento. La primera consiste en combinar las materias primas, para que el Clínter resultante tenga una composición determinada, de modo que se puedan establecer las propiedades. Por ejemplo, un Clínter elaborado con materia prima que permita la obtención de un alto contenido de C₃S y una adecuada finura durante la molienda, permiten obtener cementos con altas resistencias iniciales. Otro, elaborado con bajos contenidos de C₃A, lo hacen resistente al ataque por sulfatos y de bajo calor de hidratación.

La segunda alternativa consiste en incluirle al cemento adiciones, de modo que incidan en las propiedades y en la denominación.

El nombre y la clasificación del cemento se hacen de acuerdo con la normativa del país originario, existiendo en general dos tendencias a nivel mundial: la americana y la europea. En Estados Unidos rige la norma ASTM C150, para los cementos Pórtland, la ASTM C595, para los cementos hidráulicos producidos mediante mezclas (cementos mezclados), y la ASTM C1157, que regula los cementos hidráulicos por desempeño; en Europa gobierna la UNE-EN197-1.

Los cementos hidráulicos son los que se fraguan y endurecen en presencia de agua. También mantienen su resistencia y son estables bajo agua. En tal sentido, tanto los cementos Pórtland como los obtenidos mediante mezclas o los evaluados por desempeño, son “cementos hidráulicos”. Por eso se usa este calificativo para denominar a todos los cementos empleados en la construcción con concreto.

2.5.1 Cementos Pórtland

En el sentido estricto, el cemento Pórtland es lo que resulta de moler conjuntamente Clínter – yeso. Es-

pecíficamente, la norma ASTM C150 permite la inclusión hasta en 5% de caliza molida con el Clínter.

La ASTM clasifica a los cementos Pórtland en 8 tipos enumerándolos del I al V, tal como lo muestra la Tabla 2.3, incluyendo los cementos Pórtland Tipo I-A, II-A y III-A, que son los mismos Tipo I, II y III, excepto que durante el proceso de pulverización del Clínter se le adiciona un incorporador de aire, que le da al concreto propiedades especiales, tal como se estudia en el Capítulo 5.

Cemento Pórtland: Es un tipo de cemento hidráulico producido mediante la pulverización de Clínter y yeso, y que contienen hasta un 5% de caliza, y adiciones de proceso. Tiene controladas tanto su composición química, como las características físicas.

Tabla 2.3. Tipos de cementos Pórtland según ASTM C150

Tipo de cemento	Uso	Ejemplo de uso
I	Cuando no es requerida ninguna de las propiedades especiales de los otros cementos	Estructuras de concreto en general como vigas, columnas, losas y muros, entre otras, donde no son requeridas propiedades especiales de los demás cementos.
II	Cuando precisa moderada resistencia a los sulfatos o moderado calor de hidratación	Estructuras de drenaje, donde las concentraciones de sulfatos en aguas subterráneas son moderadas. Estructuras de masa considerable, como en muros de contención o cimentaciones masivas. Aguas freáticas o de infiltración, con moderadas concentraciones de sulfatos.
III	Cuando se requieren altas resistencias iniciales	En estructuras donde hay que desformaletar pronto, como estructuras industrializadas, o cuando la estructura debe ponerse al servicio rápidamente.
IV	Cuando es necesario bajo calor de hidratación	Para estructuras de concreto masivo, como grandes presas, donde existen altas diferencias de temperatura entre el interior y la parte externa de la estructura.
V	Cuando necesita alta resistencia a los sulfatos	Para estructuras en contacto con suelos o aguas con alto contenido de sulfatos.

2.5.2 Cementos mezclados

Los cementos mezclados provienen del cemento Pórtland y, como su nombre lo indica, la mezcla de una o más adiciones con puzolanas. Según su forma de fabricación, puede emplearse para usos generales o especiales. La norma ASTM C595 los clasifica como aparecen en la Tabla 2.4. La elaboración de los cementos mezclados puede realizarse de tres formas diferentes. La primera, consiste en moler conjuntamente el Clínter con el yeso y la adición. La segunda, moliendo separadamente la adición y mezclarla con el cemento Pórtland; y la tercera, una combinación de molienda conjunta y mezcla.

Cementos mezclados: son cementos hidráulicos obtenidos a través de la mezcla de cemento Pórtland con otros materiales inorgánicos, que en forma conjunta o independiente, contribuyen a desarrollar las propiedades del cemento. Los materiales inorgánicos pueden ser puzolanas, escorias, caliza o sus mezclas. Puede incluir o no otros constituyentes.

Tabla 2.4. Cementos mezclados según ASTM C595

Denominación	Tipo	Propiedades y usos
Cemento Pórtland de escoria de alto horno	IS	Para la construcción de concreto en general. El contenido de escoria puede variar entre el 25% y 70% de la masa de cemento. Opcionalmente pueden incluir aire (A), con moderada resistencia a los sulfatos (MS) o moderado calor de hidratación (MH). Ejemplo: cemento Pórtland con escoria de alto horno con inclusor de aire: 1S-A (MS).
Cemento Pórtland puzolánico	IP	Para uso de la construcción en general. El contenido de puzolana puede estar entre 15% y 40% de la masa de cemento. Opcionalmente pueden incluir aire (A), de moderada resistencia a los sulfatos (MS) o moderado calor de hidratación (MH). Puede ser la combinación de cemento de alto horno y puzolana.
	P	Para construcciones que no requieren altas resistencias iniciales. El contenido de puzolana puede estar entre 15% y 40% de la masa de cemento. Es posible especificar con bajo calor de hidratación (LH), moderada resistencia a los sulfatos (MS) o aire incorporado (A). Puede ser la combinación entre cemento de alto horno y puzolana.
Cemento Pórtland modificado con puzolana	I(PM)	Para construcciones de concreto en general. Su fabricación está dada al combinar cemento Pórtland o el cemento Pórtland de alto horno y una puzolana. El contenido de puzolana es menor al 15% de la masa de cemento. Se pueden especificar con inclusor de aire (A), con moderada resistencia a los sulfatos (MS) o moderado calor de hidratación (MH).
Cemento de escoria o siderúrgico	S	Se fabrica mezclando escoria granulada de alto horno, con cemento Pórtland o con cal hidratada, o una combinación de escoria granulada de alto horno, con cemento Pórtland y cal hidratada. Se usa con el cemento Pórtland para la elaboración de concreto, o con cal, para la elaboración de mortero. El contenido mínimo de escoria es de 70% y se puede especificar con aire incluido (A). Ejemplo S-A.
Cemento Pórtland modificado con escoria	I(SM)	Para la construcción de concreto en general. Se fabrica combinando escoria granulada de alto horno finamente molida con cemento Pórtland. El contenido de escoria es menor al 25% de la masa del cemento. Se pueden especificar con inclusor de aire (A), de moderada resistencia a los sulfatos (MS) o moderado calor de hidratación (MH); ejemplo: 1(SM)-A (MH).

2.5.3 Cementos hidráulicos por desempeño

La norma ASTM C1157, especificación por desempeño para cementos hidráulicos, fue creada en los años 90, revistiendo particular interés para Colombia, pues ella fue la base para la modificación de la norma NTC 121, que antes especificaba los cementos por prescripción, es decir, controlando la cuantía de algunos componentes químicos. La Tabla 2.5 resume los tipos de cemento por desempeño, la característica de cada uno y algunos ejemplos de uso.

Cemento hidráulico por desempeño: son cementos que no tienen restricciones para su composición química o sus constituyentes, con exigencias en propiedades de comportamiento que son predominantemente físicas, tales como resistencia, tiempo de fraguado, expansión por autoclave, entre otras.

Tabla 2.5. Cementos hidráulicos por desempeño según la NTC 121

Denominación NTC 121 (ASTM C1157)	Tipo de cemento	Ejemplos de uso
UG (GU)	Uso general	Para uso en estructuras en general, pavimentos, pisos, losas, prefabricados, y en general, en todas las aplicaciones donde no sean requeridas las propiedades especiales de los otros tipos de cemento.
ART (HE)	Alta resistencia temprana	Para estructuras que requieren menor tiempo en formaleta, o donde es necesario poner en uso la estructura en menor tiempo, concreto pre esforzado, prefabricados.
MRS (MS)	Moderada resistencia a los sulfatos	Estructuras de drenaje, tuberías, plantas para tratamiento del agua y en contacto con aguas freáticas con baja concentración de sulfatos.
MCH (MH)	Moderado calor de hidratación	Estructuras medianamente masivas donde es prudente controlar el aumento de temperatura.
ARS (HS)	Alta resistencia a los sulfatos	Para estructuras en contacto con aguas o suelos con alto contenido de sulfatos como suelos con altas concentraciones de yeso.
BCH (LH)	Bajo calor de hidratación	Para estructuras consideradas masivas, en donde la diferencia de calor entre el interior y el exterior supera los 20°C, como presas y cimentaciones masivas.

En Colombia todas las fábricas producen los cementos tipo UG y la mayoría también elabora los ART. Los otros cementos son considerados especiales, consiguiéndose bajo pedido para una obra particular, dependiendo de las materias primas disponibles y la posibilidad de la planta para su producción. Requieren de una adecuada coordinación para su entrega y unas cantidades mínimas para su producción (generalmente mayores a 300 t).

2.5.4 Cemento blanco

El cemento blanco es el mismo gris, difiriendo principalmente en el color. La clave para producir el color blanco consiste en controlar el proceso de manufactura, seleccionando las materias primas cuyo contenido de hierro, magnesio y manganeso sea prácticamente nulo, puesto que son estos elementos que le confieren la coloración gris al cemento. También, es importante realizar su proceso de molienda con cuerpos molidores diferente al acero-molibdeno, para que las trazas producidas por el desgaste de las bolas no afecte el color.

Cemento blanco: cemento hidráulico producido de tal forma, que obtenga un color característicamente blanco.

Justamente, por el mayor costo que se incurre en el proceso de fabricación, el cemento blanco era usado hasta hace unos años en el país con fines arquitectónicos secundarios tales como estucos, detalles decorativos, enlucidos y revoques. No obstante, hacia los años 90, en Colombia volvió a dársele importancia al color blanco en las estructuras de concreto a la vista, elaborando obras de envergadura, siendo necesario actualizar la norma NTC 1362, en la que además de contemplar su blancura, se midiera la resistencia y demás características mecánicas exigidas a un cemento estructural.

2.5.5 Otros cementos

Existen otros tipos de cemento para aplicaciones muy especiales, como el aluminoso, el de mampostería, los expansivos y los de pozos de petróleo, entre otros.

Cemento aluminoso

Es un tipo de cemento hidráulico, obtenido por la fusión de materiales calcáreos y aluminosos y su posterior pulverización. Como lo sugiere su nombre, tiene altos contenidos de aluminio; se conforman aproximadamen-

te de 40% de cal, 40% de aluminio, 8% de sílice y pequeñas cantidades de óxidos ferrosos y férricos. Las materias primas más usadas para su elaboración son la caliza y la bauxita.

Cemento aluminoso: es un tipo de cemento hidráulico que tiene una composición química y características físicas que le permiten desarrollar altas resistencias químicas y mecánicas a altas temperaturas.

El cemento aluminoso se caracteriza por su rápido endurecimiento y su elevada resistencia a las 24 horas, obteniéndose a esta edad cerca del 80% de la obtenida a los 28 días. Con su empleo en el concreto, se logra una gran economía en el uso de la formaleta (permite su retiro alrededor de las 7 horas) y menor tiempo en la entrega de las obras.

Pero tal vez su característica más importante es la ausencia de hidróxido de calcio, haciéndolo muy resistente al ataque químico, en especial a los sulfatos. Adicionalmente, se obtienen concretos menos permeables, puesto que el hidróxido de calcio es soluble en agua ligeramente ácida. Así mismo, es resistente al ataque por dióxido de carbono disuelto en agua, lo que lo hace ideal en la fabricación de tubos para alcantarillado.

Otra de las ventajas que presenta el cemento aluminoso es su resistencia a las altas temperaturas, empleándose como cementante refractario. Pero se debe ser cuidadoso cuando el concreto hecho con cemento aluminoso se encuentre en presencia de altas temperaturas y expuesto a humedad continua, toda vez que la resistencia puede verse afectada de manera adversa.

Por otra parte, el concreto reforzado con cemento aluminoso no admite la adición de cloruro de calcio, pues forma cloroaluminatos que fomentan la corrosión del acero. Estos cementos no se producen en el país.

Cemento de mampostería

El cemento de mampostería se obtiene por la molienda conjunta de Clínker, la adición de yeso y materiales que carecen de propiedades hidráulicas o puzolánicas. El contenido de materiales adicionales está comprendido entre el 15% y el 50% en de la masa total.

Es usado especialmente para la elaboración de morteros para pega de ladrillo, pañetes y afinado de pisos. Para estas aplicaciones, dada la desproporción del área que se va a cubrir con el pequeño espesor de la capa de mortero y lo absorbente de los materiales que se van a

recubrir (ladrillos de concreto o arcilla), se puede presentar una pérdida apreciable del agua de la mezcla, por lo que el cemento tradicional se queda sin posibilidades de reaccionar, formándose productos pobres. Por esta razón, se recomienda que al cemento se le adicione un producto que retenga el agua y le ayude a la manejabilidad en estado fresco, utilizándose para el efecto caliza finamente molida o cal hidratada, conjuntamente con un agente inclusor de aire, componentes normalmente formulados desde la fabricación.

Cemento de mampostería: es un tipo de cemento hidráulico fabricado con el fin de usarse en morteros de mampostería o en revoques (pañetes o repellos) con plastificantes y otras adiciones que incrementan su desempeño.

La resistencia de un cemento de mampostería es menor que en un cemento normal, por lo que no es recomendable su uso en concreto estructural; de hecho, la NSR – 10 prohíbe explícitamente su uso en la fabricación de concreto. En Colombia, varias fábricas han elaborado este cemento, teniendo que sacarlo eventualmente del mercado, por confusiones y usanza como cemento estructural.

Cementos expansivos

Son cementos hidráulicos que sufren una ligera expansión durante el inicio del endurecimiento, gracias a la inclusión de elementos especiales. Son usados para la elaboración de concretos de contracción compensada, que sirven para:

- Compensar la disminución de volumen ocasionado por la contracción por secado, mitigando la fisuración.
- Inducir esfuerzos de tracción en la armadura del concreto postensado.
- Estabilizar a largo plazo las dimensiones de las estructuras de concreto postensado respecto al diseño original.

Cemento expansivo: es un tipo de cemento hidráulico que, al mezclarse con agua, forma una pasta que incrementa controladamente el volumen durante su fraguado.

Cementos para pozos de petróleo

Son cementos fabricados con Clínter de cemento Pórtland o por medio de adiciones. Son empleados para cementación de pozos petroleros (lechada que adhiere la tubería del pozo con el terreno). Sus características fundamentales, son: tiempo de fraguado lento, resistencia a las altas temperaturas y presiones generadas dentro de los pozos.

El Instituto Americano del Petróleo – API, los clasifica dependiendo de la profundidad donde serán empleados, siendo los más usados el Clase A, para las cementaciones superficiales; los Clase G, en las intermedias; y los Clase H, para las profundas. Opcionalmente se consiguen en grado O (ordinarios),

MRS (de moderada resistencia a los sulfatos) y ARS (alta resistencia a los sulfatos), de modo que se puede tener, por ejemplo, un cemento Clase H - ARS. En Colombia algunas fábricas producen el Clase A y el Clase G.

Hay otros muchos tipos de cemento que se escapan del alcance en este documento. Para mencionar tan solo algunos: cementos plásticos, ultrafinos, repelentes al agua, geopolímeros, etringita, de aluminato de calcio, de fosfato de magnesio y cementos con pigmentos blancos.

Cementos europeos

Aunque en los países de América generalmente se fabrican y usan los cementos designados por la ASTM, el mundo globalizado de hoy tiende a que se especifiquen y empleen también los europeos. La Tabla 2.6 muestra la clasificación de la norma UNE-EN-197

Cemento petrolero: es un cemento hidráulico diseñado con tiempos de fraguado prolongado, resistente a altas temperaturas y presiones como las existentes en los pozos petroleros.

Tabla 2.6. Clasificación de los cementos europeos (2.11)

Tipos principales	Designación y denominación de tipos de cementos comunes		Composición (Proporción en masa) ^A										
			Compuestos principales										Mino- ritarios
			Clínter	Escoria de alto horno	Humo de sílice	Puzolana		Ceniza volante		Esquis- to calci- nado	Caliza		
						Natural	Natural calci- nada	Silíceo	Calci- nada		L	LL	
K	S	D ^B	P	Q	V	W	T	L	LL				
CEM I	Pórtland	CEM I	95 a 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 a 5
CEM II	Pórtland con escoria	CEM II/A-S	80 a 94	6 a 20	-	-	-	-	-	-	-	-	0 a 5
		CEM II/B-S	65 a 79	21 a 35	-	-	-	-	-	-	-	-	0 a 5
	Pórtland con humo de sílice	CEM II/A-D	90 a 94	-	6 a 10	-	-	-	-	-	-	-	0 a 5
	Pórtland con puzolana	CEM II/A-P	80 a 94	-	-	6 a 20	-	-	-	-	-	-	0 a 5
		CEM II/B-P	65 a 79	-	-	21 a 35	-	-	-	-	-	-	0 a 5

Tabla 2.6. (Continuación)

Tipos principales	Designación y denominación de tipos de cementos comunes		Composición (Proporción en masa) ^a											
			Compuestos principales										Minoritarios	
			Clinker	Escoria de alto horno	Humo de sílice	Puzolana		Ceniza volante		Esquisto calcinado	Caliza			
						Natural	Natural calcinada	Silíceas	Calcina-da		L	LL		
K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L	LL					
CEM II	Pórtland con puzolana	CEM II/A-Q	80 a 94	-	-	-	6 a 20	-	-	-	-	-	0 a 5	
		CEM II/B-Q	65 a 79	-	-	-	21 a 35	-	-	-	-	-	0 a 5	
	Pórtland con ceniza volante	CEM II/A-V	80 a 94	-	-	-	-	6 a 20	-	-	-	-	0 a 5	
		CEM II/B-V	65 a 79	-	-	-	-	21 a 35	-	-	-	-	0 a 5	
		CEM II/A-W	80 a 94	-	-	-	-	-	6 a 20	-	-	-	0 a 5	
		CEM II/B-W	65 a 79	-	-	-	-	-	21 a 35	-	-	-	0 a 5	
	Pórtland con esquisto calcinado	CEM II/A-T	80 a 94	-	-	-	-	-	-	6 a 20	-	-	0 a 5	
		CEM II/B-T	65 a 79	-	-	-	-	-	-	21 a 35	-	-	0 a 5	
	Pórtland con caliza	CEM II/A-L	80 a 94	-	-	-	-	-	-	-	6 a 20	-	0 a 5	
		CEM II/B-L	65 a 79	-	-	-	-	-	-	-	21 a 35	-	0 a 5	
		CEM II/A-LL	80 a 94	-	-	-	-	-	-	-	-	6 a 20	0 a 5	
		CEM II/B-LL	65 a 79	-	-	-	-	-	-	-	-	21 a 35	0 a 5	
	Pórtland compuesto ^c	CEM II/A-M	80 a 94	6 a 20									0 a 5	
		CEM II/B-M	65 a 79	21 a 35									0 a 5	
	CEM III	Pórtland de alto horno	CEM III/A	35 a 64	36 a 65	-	-	-	-	-	-	-	-	0 a 5
			CEM III/B	20 a 34	66 a 80	-	-	-	-	-	-	-	-	0 a 5
CEM III/C			5 a 19	81 a 95	-	-	-	-	-	-	-	-	0 a 5	
CEM IV	Puzolánico ^c	CEM IV/A	65 a 89	-	11 a 35					-	-	-	0 a 5	
		CEM IV/B	45 a 64	-	36 a 55					-	-	-	0 a 5	

Tabla 2.6. (Continuación)

Tipos principales	Designación y denominación de tipos de cementos comunes		Composición (Proporción en masa) ^A									Minoritarios	
			Compuestos principales										
			Clinker	Escoria de alto horno	Humo de sílice	Puzolana		Ceniza volante		Esquis-to calci-nado	Caliza		
						Natural	Na-tural calci-nada	Silíceo	Calcina-da				
K	S	D ^B	P	Q	V	W	T	L	LL				
CEM V	Com-puesto ^C	CEM V/A	40 a 64	18 a 30	-	18 a 30		-	-	-	-	0 a 5	
		CEM V/B	20 a 38	31 a 50	-	31 a 50		-	-	-	-	0 a 5	

^A Los valores de la tabla están referidos a la suma de los componentes principales y minoritarios adicionales.

^B La proporción de humo de sílice está limitada al 10%.

^C En los cementos Pórtland compuestos CEM II/A-M y CEM II/B-M, en los cementos puzolánicos CEM IV/A y CEM IV/B y en los cementos compuestos CEM V/A y CEM V/B, los componentes principales diferentes del Clinker deben declararse en la designación del cemento.

2.6 Propiedades del cemento

Como se puede inferir, el cemento tiene una serie de características físicas, químicas y mecánicas, que le son transmitidas al concreto. Las siguientes son las propiedades más importantes del cemento que ayudarán a comprender el funcionamiento, alcance y limitaciones en el uso en estructuras de concreto.

del 90% de la masa del cemento, y cuyas propiedades generales fueron descritas.

En otras palabras, cuando el cemento es mezclado con agua, forma una pasta manejable, que con el tiempo se torna rígida y dura, dando origen a propiedades mecánicas.

2.6.1 Hidratación

Como fue visto, durante la formación del Clinker en el horno, se forman los cuatro compuestos principales (C_2S , C_3S , C_3A y C_4AF) que corresponden cerca

En la química del cemento es muy común usar el término “fase” en lugar de “compuesto” para describir los componentes del Clinker, tal como muestra la Tabla 2.7.

La hidratación del cemento: es un proceso mediante el cual el cemento, en presencia de agua, reacciona químicamente desarrollando sus propiedades aglomerantes; es decir, los componentes principales del cemento en presencia de agua se hidratan, formando nuevos compuestos, que con el tiempo, constituyen la pasta de cemento endurecida.

Tabla 2.7. Fases del Clinker

Compuesto	Fase	Contenido aproximado del Clinker (%)	Compuestos formados por la hidratación
C_3S	Alita	50 a 70	Hidróxido de calcio (Portlandita o CH) y silicato de calcio hidratado (Gel de Tobermorita, o CSH).
C_2S	Belita	15 a 30	
C_3A	Aluminato	5 a 10	Aluminato tetracálcico hidratado (en reacción con el hidróxido de calcio).
C_4AF	Ferrita	5 a 15	Ferroaluminato de calcio hidratado.

Con el desarrollo de las técnicas de microscopía, es posible identificar y analizar cada uno de los compuestos del cemento. También se pueden calcular mediante el análisis químico de los óxidos del cemento sin hidratar (anhidro), a través de las fórmulas desarrolladas por Bogue y, más preciso, con las técnicas para difracción de Rayos X.

Los constituyentes C_3S y C_2S forman entre el 70% y el 80% del cemento. Son los elementos más estables y los que más contribuyen a su resistencia. El C_3S se hidrata más rápidamente que el C_2S y, por lo tanto, contribuye al tiempo de fraguado y a la resistencia inicial. Su hidratación contribuye a la resistencia entre las 24 horas y los 7 días, provocando el endurecimiento normal en la pasta de cemento. El desarrollo de la resistencia del C_2S es lento, manifestándose generalmente luego de una semana, pero puede continuar por encima de un año.

El C_3A se hidrata rápidamente, es el responsable del fraguado y genera mucho calor. Solamente contribuye a la resistencia las primeras 24 horas y es el menos estable de los componentes. Además le infiere propiedades indeseables al concreto, como cambios volumétricos y baja resistencia a los sulfatos.

El C_4AF cumple la función de catalizador; resulta del uso del hierro y el aluminio en la fabricación del cemento; su aporte al desarrollo de la resistencia es poco. La Figura 2.9 muestra la contribución a la resistencia de los compuestos principales.

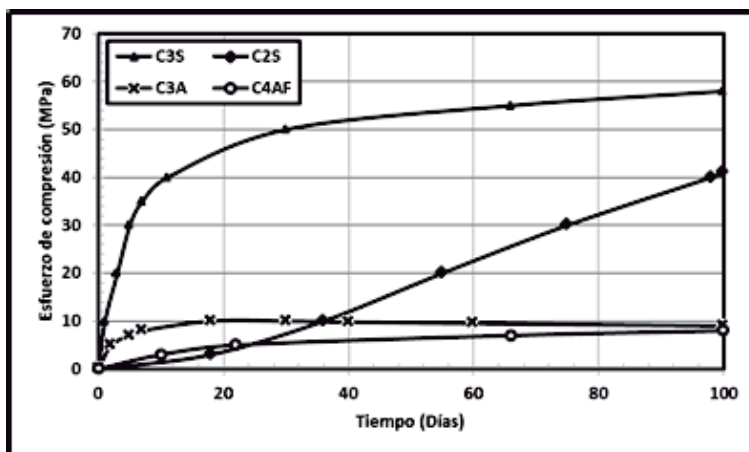


Figura 2.9. Aporte de resistencia en los compuestos principales del cemento

El proceso de hidratación comienza desde la parte externa del grano de cemento hacia su interior, hasta formar una película superficial que va ganando profundidad a medida que va desarrollándose el proceso con el tiempo, quedando en el interior una parte sin reaccionar.

Por otro lado, el proceso de hidratación se caracteriza porque no se desarrolla a una velocidad constante, sino que disminuye con el tiempo. Tal como lo describe Neville, se ha encontrado que la profundidad de hidratación de un grano de cemento en contacto permanente con agua, es de aproximadamente 4 μm luego de 28 días, y

de 8 μm luego de un año; de manera tal que habrá una gran cantidad de partículas, especialmente las más gruesas, que en su interior contienen material que aún puede reaccionar. Esto explica por qué hay granos que pueden durar varios años sin hidratarse, o no hidratarse nunca.

Lo anterior significa que para aprovechar el potencial de reacción del cemento con el agua, es necesario seguir hidratando la mezcla una vez ésta haya fraguado. A

este proceso, que se denomina “curado”, será más eficiente en la medida que se aplique oportunamente y se mantenga constante, por lo menos, los primeros 7 días, en los que se desarrolla con mayor velocidad el proceso de hidratación.

sición de resistencia, tal como se aprecia en la Figura 2.10. A 1 día, tiene aproximadamente el 10%; a los 3 días, cerca del 40%; a los 7 días, alrededor del 70%; y a los 14 días del 90%, respecto de la resistencia a 28 días.

El proceso de hidratación está muy ligado a la adqui-

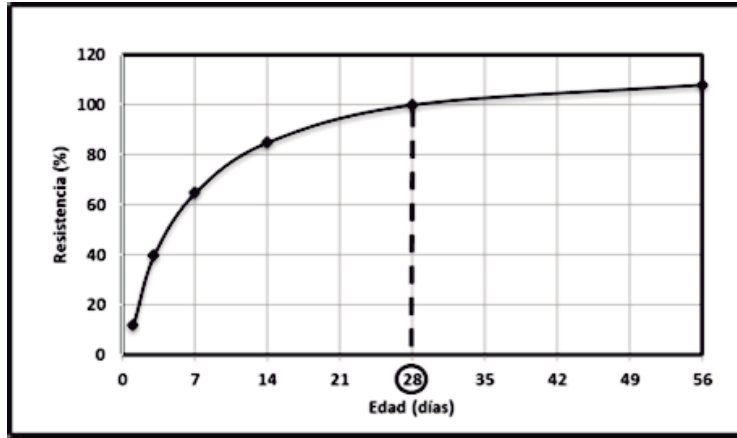


Figura 2.10. Esquema en la adquisición de resistencia del cemento con la edad

La Figura 2.11 explica el desarrollo en la adquisición de resistencia para los cementos Pórtland. Por lo general, para los cementos que llevan adiciones el comportamiento es diferente, pues a edades iniciales la resistencia suele ser menor los primeros días (aproximadamente las dos primeras semanas), pero luego es mayor, especialmente después de 28

días. Esto está explicado por el tiempo que toma la formación de hidróxido de calcio y la reacción con los productos amorfos de las adiciones. La diferencia en el desarrollo de resistencias de los cementos, vistos en la Figura 2.11, obedece a las diferentes tipos y cuantías en la adición.

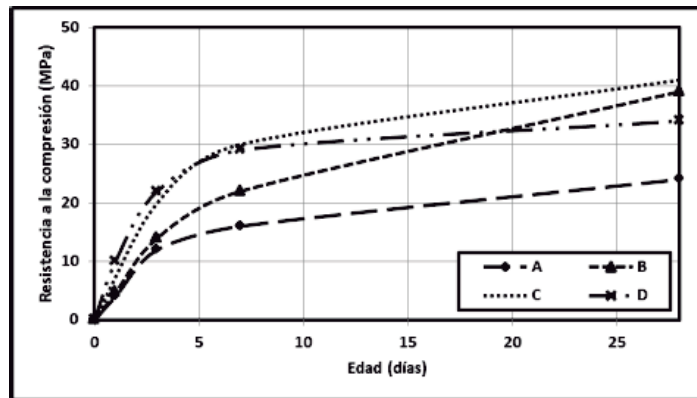


Figura 2.11. Esquema en el desarrollo de resistencia de cementos con diferente tipo de adición

2.6.2 Calor de hidratación

Como se mencionó, el proceso de hidratación en el cemento es una reacción química y como tal tiene consecuencias. Una de ellas es la liberación de calor durante el proceso de fraguado y el comienzo de endurecimiento, fenómeno denominado como “calor de hidratación”.

Calor de hidratación: es la liberación de energía calorica en el cemento como consecuencia de las reacciones químicas durante su hidratación.

Cada compuesto principal del cemento aporta, en mayor o menor medida, al calor de hidratación, es decir, la cantidad de calor generado por un cemento depende

de su composición química y, en general, corresponde al equivalente al sumar el calor generado por cada uno de los compuestos individuales.

Se expresa en kilojulios por kilogramo de cemento (kJ/kg) o en kilocalorías por kilogramo de cemento (kcal/kg). Para dar una idea de cuán rápido es el desarrollo del calor de hidratación, en la primera hora puede ser 3,2 kJ/s kg; a las 10 h, 2,5 kJ/s kg; a las 20 h, 1,8 kJ/s kg; a las 30 h, 1,5 kJ/s kg; y a las 40 h, 0,5 kJ/s kg. La Figura 2.12, muestra un esquema en el desarrollo del calor de hidratación en el cemento, según el tiempo y las diferentes fases.

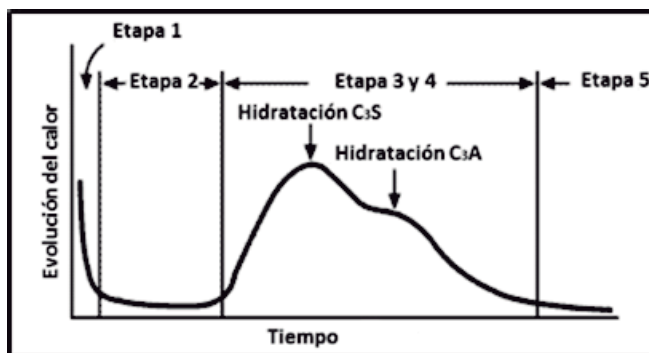


Figura 2.12. Esquema de la rapidez en el desarrollo del calor de hidratación con el tiempo

El calor de hidratación generado por el cemento se manifiesta durante los procesos de fraguado y endurecimiento, presentándose el pico máximo de temperatura durante el fraguado. Cuando termina este proceso, comienza un descenso térmico dando origen a la contracción en el material y a esfuerzos de tensión internos que, cuando superan los que puede resistir el concreto, ocasionan su agrietamiento.

El efecto de calor de hidratación cobra mayor validez en la medida que la estructura gana espesor. Es así como en los concretos masivos se puede concentrar tal cantidad de calor en su interior, sin que se pueda disipar fácilmente, como sí lo hace en la parte externa de la estructura. Esta situación crea un diferencial de temperatura que, cuando supera los 20 °C, se pueden generar graves fisuras o grietas en la estructura. Las secciones delgadas disipan el calor de hidratación difundiéndolo al ambiente, intercambio que es más difícil en la medida que la sección gana espesor.

Como se aprecia, el calor de hidratación en el cemento puede llegar a ser una propiedad nociva en el concreto y por tanto hay que controlarlo. Para ello existen varias formas, una consiste en usar cementos cuyo contenido de C_3A y C_3S sea bajo, pues son los componentes que mayor calor de hidratación generan. Otra alternativa es usar cementos con adiciones que aportan bajo calor de hidratación, como es el caso de las escorias de alto horno y el metacaolín. Otra alternativa consiste en controlar la temperatura del concreto a edades tempranas, manteniendo la estructura húmeda o con redes internas de enfriamiento. Otra, es colocando el agua de mezclado del concreto en forma de escarcha de hielo.

Por el contrario, en climas fríos (tempe-

raturas inferiores a 10 °C), el calor de hidratación puede ayudar a contrarrestar el retraso en el desarrollo en la resistencia del concreto y a proteger la estructura contra los daños causados por eventuales heladas.

Por lo anterior, el conocimiento de la cantidad de calor generado por un determinado cemento, puede resultar útil en el planeamiento y control de la construcción. Para el efecto, existen varios métodos, como el descrito en la NTC 117, cuyo procedimiento se basa en la diferencia entre el calor de disolución del cemento sin hidratar en determinadas condiciones, y el calor de disolución parcialmente hidratado, a edades comprendidas entre los 7 y 28 días, bajo las mismas condiciones de ensayo.

Otro ensayo consiste en calcular el calor de hidratación aproximado, mediante la Ecuación 2.1, obtenida luego de ensayar varios cementos en el mercado.

$$C_H = 136(C_3S) + 62(C_2S) + 200(C_3A) + 30(C_4AF)$$

Ecuación 2.1

Donde:

C_H , es el calor de hidratación de un gramo de cemento.

Los términos numéricos indican el porcentaje en peso de los compuestos entre paréntesis.

2.6.3 Densidad

La densidad del cemento es una propiedad física que relaciona la masa y el volumen que ésta ocupa. Sus unidades se expresan en masa por unidad de volumen (g/cm^3 , kg/m^3 , o t/m^3).

El valor varía según el tipo de cemento. En uno Portland puede estar entre $3.100 kg/m^3$ y $3.150 kg/m^3$; en los cementos que contienen adiciones, su valor puede variar entre $2.700 kg/m^3$ y $3.000 kg/m^3$. El menor valor obedece a las adiciones pues, por lo general son muy finas y menos densas que el Clínter; por ejemplo, la densidad de una ceniza puede llegar a ser de $2.000 kg/m^3$.

El valor de la densidad en el cemento no es un indicativo de su calidad, pero sí puede dar una idea sobre si el cemento contiene adición y su cuantía. La principal aplicación está en el diseño de mezclas de concreto, puesto que estas son hechas por masa para elaborar un metro cúbico.

El método más usado para determinar la densidad

del cemento es el Frasco de Le Chatelier (Figura 2.13), cuyo procedimiento está relacionado en la NTC 221. Consiste en introducir una muestra de cemento de masa conocida, en un recipiente graduado (Frasco de Le Chatelier), con un líquido que no reacciona con él (kerosene o nafta). El cemento desplaza el líquido, de modo que es factible conocer el volumen ocupado por el cemento. La densidad aparente (antes desidad especifica o gravedad especifica) es la relación entre la masa introducida y el volumen que ocupa.



Figura 2.13. Frasco de Le Chatelier para medir el peso específico del cemento †

2.6.4 Densidad suelta

La densidad suelta, anteriormente llamada peso litro del cemento, densidad bulk, o granel, es la relación entre la masa de una muestra de cemento y el volumen que ocupa, incluyendo el aire encontrado entre las partículas. Se usa para determinar la capacidad de almacenamiento de una determinada masa de cemento, especialmente cementos a granel.

Su determinación consiste en llenar un recipiente de un volumen conocido, con el cemento sin compactar, y pesar su contenido. La relación entre estas dos cantidades es la densidad suelta. El valor puede estar cerca a $1.100 kg/m^3$.

2.6.5 Superficie específica o finura

La superficie específica o finura, es una propiedad física que mide el tamaño de los granos de cemento en términos de área superficial. Para los cementos Pórtland es una propiedad importante, pues influye en factores claves como la velocidad de hidratación, la tasa de adquisición de resistencia, el costo del cemento, la cantidad de calor de hidratación liberado, la retracción, la manejabilidad y la exudación.

Como se dijo, la hidratación comienza por la superficie exterior de las partículas, así que el área superficial total representa el material susceptible de hidratación. Así, la velocidad de hidratación o la velocidad en la adquisición de resistencia, es directamente proporcional a la finura de sus partículas.

Es de recordar que el grado de finura del cemento se obtiene durante la molienda. A mayor tiempo de molido, mayor finura, pero a un mayor costo, puesto que es uno de los procesos que más consume energía. El cemento que comúnmente tiene la mayor finura es el tipo ART.

Entre más fino sea un grano de cemento, más rápido será el desarrollo de la reacción química durante el proceso de hidratación, así que, el calor de hidratación liberado será mayor. Esto lleva implícito una mayor contracción y un mayor riesgo en su fisuración en la masa de concreto. Por ello, el proceso de curado cobra mayor importancia, requiriendo ser aplicado oportunamente y con mayor intensidad.

La finura del cemento también está relacionada con su deterioro durante el almacenamiento, dado su carácter higroscópico, entre más fino, es más reactivo. En consecuencia habrá mayor probabilidad que sea hidratado con la humedad relativa del ambiente. Por tanto y para

evitar un deterioro prematuro, debe tratarse con especial atención el tipo de empaque, el sitio y tiempo de almacenamiento.

El uso de cemento con alta finura en el concreto, tiende a retener más agua de la mezcla, generando menor riesgo de exudación, pues su mayor superficie específica evita que parte del agua de mezclado migre hacia la superficie.

Así mismo, cementos muy finos requerirán una mayor cantidad de agua en el mezclado, para proveerle al concreto una determinada manejabilidad.

Por lo anterior, la finura del cemento es una propiedad significativa, que incide en buena parte en las propiedades del concreto, por lo que su medida es importante. Esta se puede realizar por métodos directos, como el tamizado, o indirectos, como el Permeabilímetro de Blaine, el Sedígrafo o el DTP Láser.

El procedimiento del Permeabilímetro de Blaine está relacionado en la NTC 33 (Figura 2.14). Consiste en medir el tiempo que tarda en pasar una determinada cantidad de aire a través de una capa de cemento. Dado que el caudal del aire que atraviesa la capa de cemento es función de la superficie específica de las partículas, la finura del cemento se determina indirectamente comparando los valores obtenidos con los de una muestra patrón de finura conocida.



Figura 2.14. Permeabilímetro de Blaine (izquierda), método de tamizado (derecha) †

La finura se expresa en términos de área superficial de las partículas contenidas en un gramo de cemento, en m^2/kg o cm^2/g . Los cementos Portland suelen presentar valores superiores a los $3.000 \text{ cm}^2/\text{g}$, mientras que los que contienen adición arrojan valores entre los $3.400 \text{ cm}^2/\text{g}$ y $5.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ o más. Anteriormente la NTC 1.21 establecía que como mínimo debía ser de $2.800 \text{ cm}^2/\text{g}$, pero la revisión de 2014 tan solo menciona que debe ser informada en todos los certificados solicitados al fabricante, sin dar un valor de referencia mínimo. La razón por la cual los cementos con adición presentan generalmente altos valores de finura, se debe a que las adiciones poseen mayor superficie específica que el Clínter molido.

Los métodos directos consisten en hacer pasar un determinado peso de cemento a través de un tamiz muy fino (mallas de $74 \mu\text{m}$ (N° 200) ó $150 \mu\text{m}$ (N° 100) ó $45 \mu\text{m}$ (N° 325), bien sea por método húmedo o seco. Los procedimientos respectivos se encuentran en las NTC 226 y 294, expresando los resultados en términos de porcentaje retenido en la malla usada.

Los modernos equipos de rayos láser, permiten determinar la distribución granulométrica de las partículas de cemento, empleando una pequeña muestra representativa.

2.6.6 Consistencia normal

Es una característica física del cemento que no se mide directamente sobre él sino sobre la pasta, la cual se forma al mezclar el cemento con el agua. La

consistencia depende básicamente de la cantidad de agua.

La consistencia normal de la pasta es un parámetro definido arbitrariamente usando las agujas de Vicat. Este equipo consiste en un soporte (Figura 2.15), que sostiene un vástago de 300 g de peso, con libertad de movimiento vertical. Los extremos del vástago permiten acoplar, en uno, un émbolo de 10 mm de diámetro, y en el otro, una aguja de 1 mm de diámetro. El vástago es reversible de modo que puede usar el émbolo o la aguja, o también sostenerse verticalmente, a la altura deseada, mediante el ajuste de un tornillo. Así mismo, el soporte tiene un índice ajustable que se mueve sobre una escala graduada en mm. Consta además de un molde con forma tronco - cónica, en el que se coloca la pasta de cemento.

El procedimiento de ensayo para medir la consistencia normal de la pasta de cemento esta descrito en la NTC 110. Consiste en preparar la pasta con 650 g de cemento y agua en una cantidad determinada. La pasta es colocada en el molde tronco - cónico, poniendo el émbolo en contacto con la superficie superior de la pasta, para luego soltarla. Dependiendo de la consistencia de la pasta, el émbolo penetra a una determinada profundidad. Si la penetración es de 10 ± 1 mm, después de 30 segundos de haber soltado el émbolo, la pasta tiene la consistencia normal.

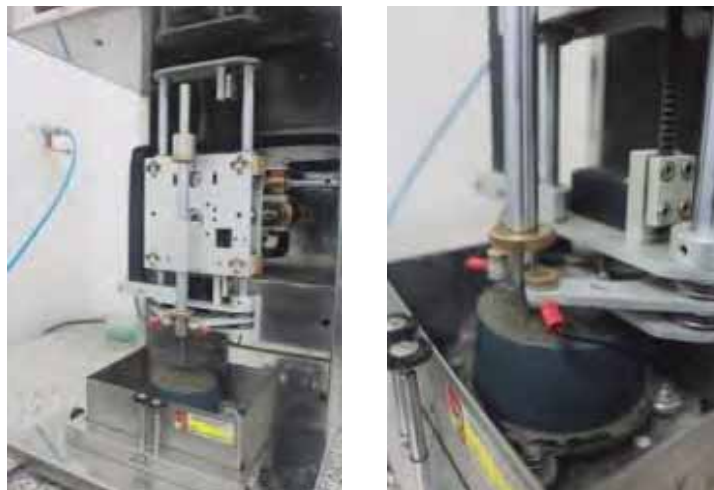


Figura 2.15. Vicat automatizado para determinar la consistencia normal y el tiempo de fraguado †

El contenido de agua en una pasta normal se expresa como porcentaje en peso del cemento seco. Usualmente varía entre 23% y 33%. En la medida que el cemento sea más fino requerirá mayor contenido de agua por tener una superficie específica mayor.

La consistencia normal es una condición previa para medir otras características como es el tiempo de fraguado y la estabilidad de volumen, indicadores directos de la calidad del cemento.

2.6.7 Tiempos de fraguado

Cuando el cemento se mezcla con el agua, la pasta resultante adquiere una plasticidad que se va perdiendo con el transcurso del tiempo, hasta que se torna rígida. Este cambio se conoce como proceso de fraguado. El tiempo que transcurre desde el mezclado hasta que esta se vuelve rígida, se conoce como tiempo de fraguado.

Es conveniente anotar que el concepto de fraguado tiende a confundirse con el de endurecimiento o resistencia. El fraguado es el cambio de estado plástico a rígido, sin que pueda resistir esfuerzos mecánicos, mientras que el endurecimiento, es el aumento progresivo de resistencia de la pasta ya fraguada.

Así, el tiempo de fraguado es un parámetro definido de manera arbitraria. En la práctica se emplean los términos de tiempo de fraguado inicial y tiempo de fraguado final. El tiempo de fraguado inicial ocurre en el lapso comprendido entre el mezclado y la pérdida parcial de plasticidad de la pasta. El tiempo de fraguado final se caracteriza porque la pasta deja de ser deformable.

Una vez sucedido el fraguado, comienza el endurecimiento o adquisición de resistencia de la pasta, proceso que, como se muestra en la Figura 2.10, se desarrolla muy rápido en las primeras edades como consecuencia propia del proceso de hidratación, y va disminuyendo con el transcurso del tiempo, de tal modo que luego de 28 días la adquisición de resistencia es relativamente pequeña, pero que continúa mientras el grano de cemento siga hidratándose.

El proceso de fraguado se caracteriza porque va acompañado del calor de hidratación. Durante el fraguado inicial hay un aumento rápido, mientras que en el final se presenta el máximo valor. De otra parte, el tiempo de fraguado está influenciado por la temperatura ambiente; a medida que se incrementa la temperatura se disminuye el tiempo de fraguado y viceversa, de modo que a menor temperatura mayor tiempo de fraguado. Con temperaturas cercanas a 0 °C se puede presentar que el cemento no reaccione y no fragüe.

El ensayo más usado para medir los tiempos de fraguado del cemento es el de las Agujas de Vicat, cuyo procedimiento se encuentra estandarizado en la NTC 118. Se basa en la obtención de una pasta de consistencia normal y sobre ella hacer penetrar la aguja de 1 mm de diámetro. Cuando la penetración es de 25 mm luego de 30 segundos de haberla soltado, se considera que se ha presentado el fraguado inicial. Por su parte, el tiempo de fraguado final se mide desde el amasado de la pasta hasta cuando la aguja apenas deja una ligera huella sin que haya penetración.

Los tiempos de fraguado son importantes porque muestran si la pasta se está hidratando de manera normal, de modo que es un indicador importante de calidad del cemento. De manera indirecta, también dan una idea acerca del tiempo disponible para el mezclado, transporte, colocación, vibrado y terminado del concreto. La NTC 121 establece que el fraguado inicial se debe presentar luego de 45 minutos, y el final, antes de 7 horas para todos los tipos de cemento.

Dentro de las anomalías presentadas durante la hidratación y que se pueden detectar a través del tiempo de fraguado, están el falso fraguado y el fraguado relámpago.

Falso fraguado

Se presenta durante los primeros minutos de mezclado del cemento con el agua, manifestándose mediante una rigidez prematura de la pasta, indicando que el cemento se está hidratando de forma anormal. Este fenómeno se conoce como falso fraguado.

El origen del falso fraguado es la deshidratación parcial o total del yeso que, como se recordará, es el elemento regulador del fraguado del cemento. La deshidratación parcial del yeso se presenta cuando:

- Se mezcla el Clínger caliente con el yeso.
- Los molinos de Clínger se calientan a temperaturas superiores a 100 °C.

También se ha reportado que hay falso fraguado cuando se produce una activación del C_3S , por aireación del cemento, en zonas de alta humedad.

El falso fraguado se caracteriza por una significativa pérdida de plasticidad sin despedir calor. Aunque este fenómeno puede causar preocupación cuando se presenta en el concreto, se soluciona simplemente con una prolongación del tiempo de mezclado, hasta que la mezcla recobre su plasticidad. No es necesario, ni se debe agregar agua para recobrar la plasticidad.

El falso fraguado puede traer consecuencias en el manejo y colocación del concreto bombeado, o cuando la mezcla se realiza en mezcladoras fijas y se transporta en equipos sin agitación. No obstante, mediante los controles rutinarios que se realizan en las plantas de cemento, actualmente las probabilidades de tener falsos fraguados son pocas. Las pruebas de laboratorio desarrolladas para la detección se relacionan en las NTC 225 y NTC 297.

Fraguado relámpago

El fraguado relámpago se presenta ante la deficiencia de yeso en el cemento y la rápida reacción del C_3A . Se manifiesta en la mezcla con una rigidización inmediata de la pasta y la generación de mucho calor de hidratación. Se previene agregando yeso de calidad idónea en la manufactura del cemento, durante la molienda conjunta con el Clínter.

2.6.8. Sanidad (estabilidad de volumen)

La sanidad del cemento es una propiedad de la pasta endurecida, que se refiere a la habilidad para conservar su volumen después del fraguado. De manera particular, la sanidad se refiere a las posibles expansiones de la pasta que puedan generar su rotura en estado endurecido. Se ha encontrado que la expansión del cemento se puede deber a la presencia de:

- Periclusa (óxido de magnesio cristalizado).
- Cal libre.
- Sulfato de calcio (yeso libre).

La Periclusa, tal como se mencionó en el proceso de fabricación del cemento, se forma como consecuencia de un enfriamiento lento del Clínter, en el que el óxido de magnesio se torna cristalino.

La cal libre presente en el Clínter se puede presentar por:

- Deficiente molienda de las materias primas.
- Insuficiente temperatura en el horno.
- Inadecuada dosificación de la caliza.

Cuando se adiciona cal al cemento, no se produce un aumento de volumen, en razón a que ésta se hidrata rápidamente antes del fraguado de la pasta. Por su parte, cuando se dosifica un contenido mayor de yeso al necesario, para que reaccione con el C_3A y permitir el proceso de fraguado, se presenta un yeso libre, que se hidrata de manera lenta, produciendo expansión en la pasta endurecida.

Dado que la expansión del cemento se manifiesta mucho después de que se ha usado el cemento en el concreto (pueden pasar meses o incluso años), se han desarrollado métodos de laboratorio que permiten conocer en cuestión de horas el potencial expansivo del cemento. Los más ampliamente usados son el de la Agujas de Le Chatelier y el del Autoclave.

El procedimiento del Autoclave se describe en la NTC 107 (Figura 2.16). Consiste en medir el cambio de longitud de unas barras de sección cuadrada de 25 mm de lado y 254 mm de longitud, hechas con pasta de cemento de consistencia normal y sometidas a un proceso acelerado de hidratación y curado durante 3 horas a 216 °C y a una presión de 20,8 kg/cm², dentro de un recipiente hermético (Autoclave). El aumento de longitud que experimentan las barras, se debe a que



Figura 2.16. Equipo de autoclave

el tratamiento en autoclave, simula las reacciones desarrolladas por el óxido de magnesio cristalizado y por la cal libre que eventualmente pudieran estar presentes en el cemento. El cambio de longitud se expresa en porcentaje de la longitud inicial.

Otro ensayo desarrollado para medir la expansión potencial del cemento es el de las Agujas de Le Chatelier, descrito en la NTC 1514 (Figura 2.17). Consiste

en medir el cambio de diámetro que se presenta en cilindros de 30 mm de diámetro y 30 mm en su altura, elaborados con pasta de cemento de consistencia normal, luego de curados, unos en agua a temperatura ambiente (21 °C) durante 6 días, y otros en agua en ebullición durante 3 horas. El aumento del diámetro

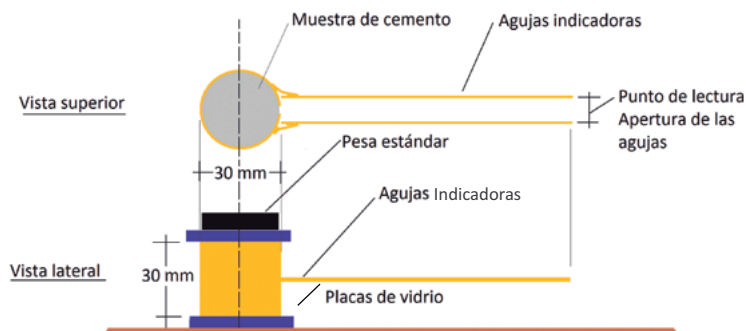


Figura 2.17. Agujas de Le Chatelier (2.11)*

que experimentan las muestras curadas a temperatura ambiente es debido, probablemente, al exceso de yeso o cal libre; mientras que la expansión de las muestras curadas en agua caliente obedece, posiblemente, a la presencia de cal libre o de magnesio.

Es de anotar que las dosificaciones normales de adiciones como ceniza volante, escoria de alto horno y puzolanas, no afectan la sanidad.

2.6.9. Tonalidad del cemento

Una de las propiedades del cemento que afecta específicamente la apariencia en el concreto y el mortero, es su tonalidad. En general, el cemento es gris debido al hierro, magnesio y manganeso y, como fue visto anteriormente, si se produce un cemento sin estos elementos, se obtiene el cemento blanco.

Pero no todos los cementos tienen la misma tonalidad de gris, pues además de resultar afectados por la mayor o menor cuantía de Fe, Mn y Mg, el tipo y cantidad de adición es determinante en la tonalidad final. Es así como las puzolanas naturales y la caliza, le dan una tonalidad clara al cemento; la ceniza volante y el humo de sílice le proporcionan una tonalidad oscura; mientras que la escoria, una vez endurecido el concreto, le confiere una tonalidad algo verdosa.

La tonalidad del cemento puede tomar importancia

cuando son concretos o morteros a la vista, cuando el arquitecto define el color y los visos que el material debe tener, e ir de la mano con el color de la arena.

Otro aspecto para tener en cuenta en la tonalidad del cemento, está en las obras de mampostería, específicamente en el mortero de pega, toda vez que si se elabora con diferentes tipos o marcas de cemento, las distintas gamas grises afectan adversamente la estética de los muros.

2.6.10. Resistencia

Sin duda, la característica más importante del cemento en lo que se refiere a requisitos estructurales, es su resistencia mecánica, siendo requisito indispensable en todas las especificaciones.

Como se ha explicado, esta propiedad es producida por la hidratación en los granos del cemento y la formación de complejas estructuras. El efecto de desarrollo en la resistencia se muestra en la Figura 2.18, en la que aparecen imágenes de cemento vistas al microscopio con diferentes grados de hidratación. Es

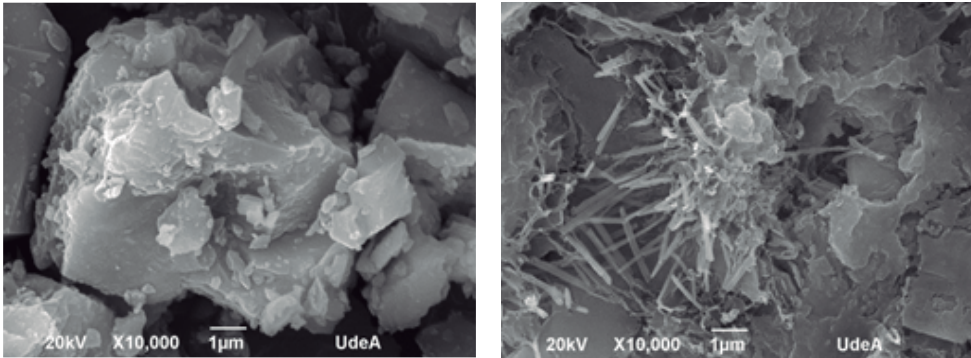


Figura 2.18. Cemento sin hidratar (izquierda), partícula hidratada (derecha). †

apreciable cómo parte del proceso está dado por la formación de filamentos, siendo más largos cuanto más hidratada esté la partícula; producto de su entrelazamiento, unen los agregados contribuyendo así a la resistencia del concreto.

Medida de la resistencia del cemento

Hasta hace algún tiempo era incierto si la resistencia mecánica del cemento se debía medir sobre probetas de pasta de cemento puro, mortero o concreto. Con base en los diferentes resultados que arrojaron las pruebas de laboratorio, las muestras de pasta de cemento puro evidencian un alto grado de dificultad para ser moldeadas, dando origen a una considerable variación en los resultados.

Por su parte, las probetas de concreto requieren de la estandarización de los agregados, en especial de la grava, toda vez que sus características (gradación, forma, textura, origen mineralógico) son determinantes en los resultados, presentando también altas dispersiones en los resultados.

No obstante, en el caso de las probetas de mortero, la arena se pudo normalizar y los resultados presentan mucha menor dispersión. Por esta razón, en la mayoría de países del mundo, incluyendo Colombia, la medida de la resistencia del cemento se hace por medio de probetas de mortero.

Para las cantidades relativas de cada uno de los componentes del mortero que se usan para la elaboración de las probetas, hay varios criterios. Uno de los más generalizados en la mayor parte de los países del mundo consiste en proporcionar, por peso, una parte de cemento por tres de arena nor-

malizada; no obstante, la norma ASTM C109 en la cual se basa la NTC 220, establece que la dosificación se debe hacer en proporción 1:2,75.

La cantidad de agua se puede determinar por medio de tres alternativas: Una europea y dos norteamericanas. El método europeo establece que la cantidad de agua debe ser tal que cumpla con una relación agua/cemento igual a 0,5 ($a/c = 0,5$), de modo que, conocido el peso del cemento con las que se van a elaborar las probetas, puede conocerse fácilmente los gramos de agua que se deben agregar a la mezcla. Por su parte, la ASTM establece, que la relación a/c debe ser igual a 0,485, o la necesaria para producir un mortero de consistencia normal. En Colombia se usa este último para los cementos Tipo UG.

El mortero de consistencia normal se determina en el laboratorio por una mesa con caída de flujo. El ensayo, descrito en la NTC 111 (Figura 2.19), consiste en colocar una muestra de mortero en un molde con forma tronco-cónico, sobre una superficie metálica circular, que mediante un mecanismo, sube el conjunto hasta una altura de 12,7 mm y cae libremente. Luego de aplicar este proceso 25 veces durante 15 segundos, la muestra de mortero experimenta un aumento en su diámetro, que depende de su consistencia. Cuando dicho aumento esté entre el 105% y el 115%, respecto a su diámetro inicial, el mortero tiene una consistencia normal.

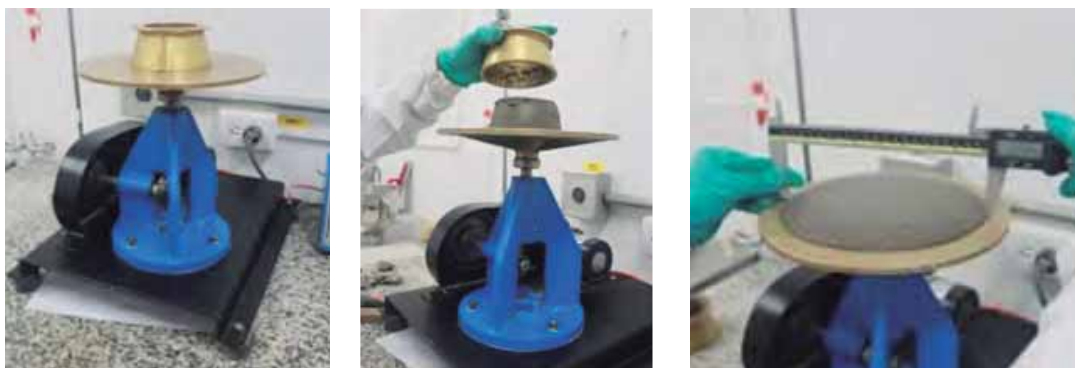


Figura 2.19. Mesa de flujo †

Como se mencionó, la arena utilizada para elaborar las probetas debe ser normalizada. En primer lugar, debe cumplir con una granulometría determinada, compuesta por tres tamaños de arena natural; en segundo lugar, debe tener un contenido de sílice superior al 95%; y en tercer lugar, la forma de sus granos debe ser aproximadamente esférica y no ser absorbente ni angulosa. Con estos requisitos se garantiza una mínima variación en los resultados obtenidos.

Por las características mencionadas, obtener ésta arena es difícil, por lo que la industria del cemento y algunos laboratorios optan por importarla de los Estados Unidos (Arena de Ottawa). Se han probado otras arenas, como la europea (CEN), arrojando resultados con valores hasta de un 20% más altos con respecto a la Arena de Ottawa. También se han probado otras arenas locales, pero con resultados dispersos.

Prácticamente, la única prueba de resistencia mecánica que actualmente se hace para evaluar la calidad del ce-

mento es la de compresión, siendo esta la que se especifica. Su medición se hace siguiendo el procedimiento dado en la NTC 220. Las probetas usadas son cúbicas de 50 mm de arista, elaboradas de forma estándar con mortero de consistencia normal. El valor de la resistencia a una determinada edad es el promedio de tres cubos hechos de la misma batchada de mortero (Figura 2.20).

La resistencia del cemento no predice la resistencia del concreto, debido a las muchas variables involucradas en las mezclas de concreto, como la resistencia propia de los agregados, su granulometría, la proporción de los componentes y los procedimientos de elaboración de las probetas, entre otros.



Figura 2.20. Elaboración y ensayo de probetas empleadas en la determinación de la resistencia del cemento †

2.7 Calidad del cemento

Con base en lo estudiado, el cemento cumple un papel preponderante dentro de la estructura, de modo que es necesario asegurar mediante la especificación que tenga las características idóneas. En Colombia básicamente rigen tres reglamentos: la norma INVÍAS, la Norma Colombiana de Diseño de Puentes y la Norma Sismo Resistente – NSR.

2.7.1 Norma INVÍAS

La Norma INVÍAS, en el Artículo 501, Suministro de Cemento Hidráulico, establece que el cemento debe cumplir con alguna de las normas para cemento de la ASTM, que son: C150 - Cemento Pórtland, C595 - Cemento Hidráulico Adicionado, C1157 - Cemento Hidráulico Especificado por Desempeño, o los requisitos particulares que se establezcan en los documentos del proyecto.

Aclara, que si en los documentos del proyecto o una especificación particular no dice algo diferente, se debe emplear Cemento Hidráulico Pórtland Tipo 1 (ASTM C150), Tipo IS o IP (ASTM C595), o Tipo GU (ASTM C1157). El constructor debe presentar los resultados de todos los ensayos físicos y químicos relacionados con el cemento, como parte del diseño de mezcla.

2.7.2 Norma colombiana de diseño sísmico de puentes - CCP-14

En general, esta norma acoge la AASHTO LRFD *Bridge Construction Specifications*, que a su vez la refiere a las normas ASTM (C150, C595 y C1157). Establece que la suma de cemento Portland y otros materiales cementicios, no se debe especificar en cantidad menor o igual a 475 kg/m³, excepto para concreto de alto desempeño (HPC), donde la suma de cemento Pórtland y otros materiales cementi-

cios (léase suplementarios) se debe especificar en cantidades menores o iguales a 590 kg/m³.

También permite el uso de materiales diferentes a los incluidos en AASHTO LRFD *Bridge Construction Specifications*. Cita como ejemplo el uso de materiales cementantes suplementarios: humo de sílice, cementos diferentes al Pórtland o cementos hidráulicos mezclados, cementos patentados con altas resistencias a edades tempranas, escoria granulada molida de alto horno, y otros tipos de materiales puzolánicos (como el metacaolín), para la obtención de altas resistencias, estableciendo que en tales casos las propiedades especificadas de dichos materiales deberían medirse usando los procedimientos de ensayo definidos en los documentos contractuales.

2.7.3 Reglamento colombiano de construcción sismo resistente NSR - 10

La NSR - 10 es, tal vez, el referente técnico más conocido y aplicado en la construcción en Colombia. El Capítulo C.3 establece que los materiales cementantes empleados para concreto deben ser fabricados bajo la norma NTC 121, permitiendo también el uso de los cementos de las normas ASTM C150, C1157 y C595 (a excepción del IS ≥ 70 ya que no puede ser empleado como cementante constituyente principal en el concreto estructural). Así mismo, autoriza el uso de los materiales cementantes suplementarios de la Tabla 2.8, que cumplan las respectivas normas.

Tabla 2.8. Materiales suplementarios autorizados por la NSR -10

Material cementante suplementario	Norma que debe cumplir
Ceniza volante, puzolana natural y materiales calcinados (como el metacaolín)	NTC 3493 (ASTM C618)
Escoria granulada molida de alto horno	NTC 4018 (ASTM C989)
Humo de sílice	NTC 4637 (ASTM C1240)

El Reglamento también faculta el uso del cemento hidráulico expansivo y del cemento blanco que cumplan con las normas NTC 4578 (ASTM C845) y NTC 1362, respectivamente. No obstante, como se mencionó anteriormente, prohíbe el uso de ce-

mentos de mampostería en la fabricación de concreto. Enfatiza que los materiales empleados en la obra, deben corresponder a los tomados como base para la selección en la dosificación del concreto.

2.7.4 Normas por prescripción y normas por desempeño

Las especificaciones del cemento pueden estar dadas por prescripción o por desempeño. En el sentido estricto, las especificaciones por desempeño se basan en probar que el cemento usado en una determinada obra o estructura, cumplirá con las características exigidas, independientemente de los materiales con los cuales fue elaborado. Por su parte, las especificaciones por prescripción, controlan ciertas características físicas y mecánicas y limitan su composición química.

En Colombia, actualmente, rige la tercera actualización de la NTC 121, que entrega la especificación por desempeño para cemento hidráulico. Corresponde a una adopción modificada de la norma ASTM C1157. La nueva versión tuvo un cambio sustancial, toda vez que la versión precedente tomaba como base la ASTM C150, que está dada por prescripción. En la Tabla 2.9, se muestran los requisitos físicos obligatorios, establecidos en la nueva norma NTC 121 y en la Tabla 2.10, los requisitos opcionales.

Tabla 2.9. Requisitos físicos obligatorios de la NTC 121

Característica	Método NTC de ensayo	Requisitos	Tipo de cemento					
			UG	ART	MRS	ARS	MCH	BCH
Finura	33 y 294	-	"Nota A"					
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	107	Menor que	0,8					
Tiempos de fraguado, ensayo de Vicat ⁸	118	Inicial, no menos de (minutos)	45	45	45	45	45	45
		Final, no más de (minutos)	420	420	420	420	420	420
Resistencia a la compresión (MPa)	220	A 1 día, mayor que	-	11	-	-	-	-
		A 3 días, mayor que	8	22	11	11	5	-
		A 7 días, mayor que	15	-	18	18	11	11
		A 28 días, mayor que	24	-	-	25	-	21
Contenido de aire en volumen de mortero	224	Máximo (%)	12					
Calor de hidratación	117	7 días máximo kJ/kg (kcal/kg)	-	-	-	-	290 (70)	250 (60)
		28 días, máximo kJ/kg (kcal/kg)	-	-	-	-	-	290 (70)
Expansión de barra de mortero 14 días	4927	Máximo (%)	0,02					
Expansión por sulfatos (resistencia a los sulfatos) ^E	3330	6 meses, % máximo	-	-	0,1	0,05	-	-
		1 año, % máximo	-	-	-	0,1	-	-

Notas

Ver página siguiente

Tabla 2.10 Requisitos físicos opcionales de la NTC 121

Característica opcional		Método de ensayo NTC	Requisitos	Tipo de cemento					
				UG	ART	MRS	ARS	MCH	BCH
Opción A	Incorporación de aire ^{c y f} . Contenido de aire en el mortero, % volumen	224	Máximo (%)	22					
			Máximo (%)	16					
Opción BRA	Baja reactividad con agregados reactivos álcali - sílice G, expansión ^a	3828	14 días, máximo (%)	0,02					
			56 días, máximo (%)	0,06					
Fraguado rápido		297	penetración final % mínimo	50					
Resistencia a la compresión _p , 28 día		220	Mínimo (MPa)	-	-	28	-	22	-
Contracción por secado		ASTM C596	Máximo (%)	Sólo a solicitud del comprador					

Notas

^A Los resultados de retenidos en tamizado por vía húmeda en el tamiz de 45 µm (N° 325) y área de superficie específica por aparato de permeabilidad al aire en m²/kg, deben ser informados en todos los certificados que sean solicitados al fabricante.

^B El tiempo de fraguado se refiere al inicial en la NTC 118.

^C Un valor en mortero no asegura, necesariamente, que el contenido de aire deseado será obtenido en el concreto.

^D El rango más bajo en resistencia cuyo mínimo se debe aplicar a menos que un rango más alto de resistencia sea especificado por el comprador.

^E En los ensayos de cemento ARS que no cumple con el límite de los 6 meses no debe ser rechazado, a menos que tampoco cumpla con el límite de 1 año.

^F Cuando esta opción se invoca, reemplaza el contenido máximo de aire del mortero que aparece en los requisitos de la tabla por defecto. La resistencia mínima a la compresión de los cementos incorporados con aire no deberá ser menor al 80%, comparada con la del cemento, que no contiene incorporador de aire.

^G El cumplimiento con estos requisitos no es necesario, a menos que el cemento vaya a ser utilizado con agregados reactivos a los álcalis.

2.8 Referencias y bibliografía recomendada

2.1. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - NSR - 10. Bogotá, AIS, 2012.

2.2. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Norma Colombiana de Diseño de Puentes. Bogotá, AIS, 2014.

2.3. BRITISH CEMENT ASSOCIATION. Concrete Technology and Construction, Portland Cement. Londres, BCA, 1984.

2.4. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. NTC 121, Especificación de desempeño para cemento hidráulico. Bogotá, D. C., 2014.

2.5. INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO. Resúmenes 06-01-163. Medellín, ICPC, 1985.

2.6. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVÍAS. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá, INVÍAS 2014.

2.7. MATA LLANA R. Fundamentos de Concreto Aplicados a la Construcción. Bogotá, D.C. ICPC, 2007.

2.8. MEHTA K. Concrete, Structure, Properties and Materials. New Jersey. Prentice - Hall, Inc. 1986.

2.9. NEVILLE, A.M. Tecnología del Concreto. México D.F., IMCYC, 1999.

2.10. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Illinois, PCA, 2004.

2.11. NORMA EUROPEA DE CEMENTO EN 197 - 1: 2011. AENOR, 2011.



3 Agregados

Los agregados para concreto son materiales, generalmente inertes, constituida por una combinación de agregados naturales o producidos al triturar rocas de mayor tamaño, y que usados con la pasta de cemento forman el concreto.

Es necesario iniciar este capítulo aclarando que la palabra “Agregados” proviene de la traducción literal del inglés “*Aggregates*”, usada principalmente en Latinoamérica para describir a los materiales que, en conjunto con la pasta de cemento, conforman el concreto. No obstante, el Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española no la contempla para estos fines, refiriéndose en cambio al término “Áridos” como las arenas y las gravas para uso en el concreto. En el presente documento, y dado que en el país ya es costumbre su uso, se hará referencia a los “agregados”.

Los agregados están compuestos por una parte fina (partículas con tamaño < 5 mm), comúnmente denominada como arena, y una parte gruesa (partículas con tamaño > 5 mm), llamada grava o piedra triturada. Ocupan las tres cuartas partes del volumen del concreto (entre el 60% y el 80%), influyendo determinantemente en todas sus propiedades.

En este capítulo se tratarán los agregados para la producción de concretos corrientes. En el Capítulo 10 serán tratados los agregados livianos para uso en este tipo de concretos que, como allí se describe, constituye una importante alternativa en la tecnología del concreto.

Algunas propiedades indispensables de los agregados para elaborar concretos de densidad normal son: una adecuada distribución en los tamaños de sus partículas, forma y textura superficial apropiada, granos densos, duros y resistentes, durables, inertes, y libres de limo, arcilla, sales, azúcares y materia orgánica. Los límites dados en este capítulo se ajustan a los especificados

por las normas NTC 174 (acogida por la NSR - 10) e INVÍAS en el Capítulo 500.

En general, las arenas y las gravas naturales son menos costosas que la pasta de cemento. Pero hay sitios donde no se consiguen agregados de buena calidad, siendo necesario su traslado desde lugares más apartados, con el consecuente incremento en el costo. Así mismo, la creciente evolución legislativa medio ambiental restringe su explotación, incrementando de igual modo su costo. Tales situaciones obligan a considerar otras alternativas, como usar escombros de la construcción y agregados producidos industrialmente, como es el caso en los agregados termo-expandidos.

3.1 Qué son los agregados

Los agregados para concreto pueden definirse como una masa de materiales, generalmente inertes, constituida por una combinación de agregados naturales o producidos al triturar rocas de mayor tamaño, y que usados con la pasta de cemento forman el concreto.

Los agregados no siempre son piedras naturales, pueden ser también productos elaborados como los agregados livianos (Capítulo 10), o productos de reciclaje tales como el ladrillo triturado,

escoria y concreto, entre otros. Por otro lado, algunos no son inertes, pudiendo reaccionar con la pasta de cemento o interfiriendo en el proceso de hidratación, ocasionando consecuencias generalmente nocivas para las propiedades en el concreto.

3.2 Clasificación

La clasificación de los agregados para concreto más usadas son según su origen o procedencia, y según el tamaño de sus partículas. También, para algunos casos específicos, resulta conveniente clasificarlos de acuerdo con su peso por unidad de volumen (o densidad).

3.2.1 Clasificación según su origen o procedencia

Según su procedencia, los agregados pueden tener origen natural o artificial.

Agregados naturales

Los agregados naturales proceden de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias; como producto de la intemperie, la erosión y por el arrastre del agua o glaciares, que dan origen a partículas de piedra, gravas, arenas, limos y arcillas.

Las arenas y gravas naturales, para uso en mezclas de concreto, es posible obtenerlas directamente de los lechos o riveras en los ríos o en los depósitos aluviales, y emplearlos con su gradación natural. Este material es conocido como canto rodado y arena de río, que deben lavarse para eliminar las impurezas que pueda tener, tal como limo, arcilla o materia orgánica (Figura 3.1).



Figura 3.1. Canto rodado procedente de río †

No obstante, dada la dificultad para que los agregados naturales tengan el tamaño requerido y la distribución granulométrica adecuada, es necesario someter las rocas más grandes a un proceso de molienda y clasificación, obteniéndose así el “triturado” o “machacado” (Figura 3.2). Al igual que el anterior, previamente el material debe lavarse, para eliminar las impurezas que pueda tener.



Figura 3.2. Grava procedente de la trituración de agregados naturales †

También puede emplearse la arena procedente de las canteras, denominada arena de peña, arena lavada o arena de pozo. Se caracterizan porque son muy finas y normalmente contienen altos contenidos de arcilla. Se emplean principalmente en la elaboración de morteros o como complemento de algunos tamaños en la arena de río.

Otra fuente de agregados naturales son las arenas procedentes de las playas y los desiertos (Figura 3.3). Estos materiales pueden ser aprovechados teniendo en cuenta tres inconvenientes: las sales presentes, las conchas y la alta finura.



Figura 3.3. Arena de mar (Cortesía Darwin Torres)

Las sales presentes son básicamente cloruro de sodio y sulfato de magnesio. El cloruro incrementa el riesgo en la corrosión del acero y en estado fresco acelera el proceso de fraguado. Los sulfatos, como ya fue mencionado en el Capítulo de Cemento, pueden generar reacciones, que degradan el concreto. Otras sales, al absorber la humedad del aire, causan manchas o eflorescencias afectando además la estética.

Las conchas son elementos duros que pueden contribuir a la resistencia, pero en estado fresco, dificultan la manejabilidad de la mezcla, por lo anguloso de sus formas.

La dificultad que presenta la alta finura de los granos de estas arenas, es la mayor demanda de agua y cemento, circunstancia que incide en la resistencia y en el costo de la mezcla.

Agregados artificiales

Son los obtenidos a partir de productos y procesos industriales. Son usados para propósitos especiales como en la elaboración de concretos livianos, donde es posible utilizar agregados de arcilla termo-expandida, ladrillo triturado, escorias de alto horno granuladas. Cabe aclarar que, para el concreto liviano con uso estructural, los agregados deben cumplir además los requisitos pedidos por la norma NTC 4045.

Por su parte, también pueden obtenerse agregados a través de procesos industriales para la producción de

concretos pesados, como la limadura de hierro y el acero. La fabricación de concretos con peso normal, es posible utilizar como agregado el Clínter, y el concreto triturado procedente de escombros de la construcción, que permiten obtener agregados a costos relativamente razonables.

3.2.2 Clasificación por tamaño

La clasificación de los agregados por el tamaño de sus partículas es tal vez la más usada, debido a que con mayor frecuencia hacen referencia al agregado grueso o grava y al agregado fino o arena. El agregado grueso puede subdividirse en piedra, grava o gravilla; y el agregado fino en arena gruesa, media o fina, según detalla la Tabla 3.1.

Al inicio se mencionó que la diferencia entre arena y grava era el tamaño, según si fuese mayor o menor a 5 mm. No obstante, tal como quedó reseñado en la Tabla 3.1, el tamaño exacto es 4,76 mm, debido a la conversión de unidades al tamaño de los tamices del sistema inglés al sistema internacional de unidades.

Tabla 3.1. Clasificación de los agregados por tamaño (3.9)

Tamaño (mm)	Mayor a 50	Entre 50 y 19,0	Entre 19,0 y 4,75	Entre 4,75 y 2,36	Entre 2,36 y 0,42	Entre 0,42 y 0,074	Entre 0,074 y 0,002	Menor a 0,002
Denominación	Piedra	Grava	Gravilla	Arena gruesa	Arena media	Arena fina	Limo	Arcilla
	Agregado grueso			Agregado fino			Fracción muy fina	
Recomendación	Material bueno para producir concreto			Material bueno para producir concreto			Material no recomendable	

De la Tabla 3.1 se observa que la fracción inferior a 0,074 mm, está clasificada como limo o arcilla, no recomendándose el uso en la elaboración de concretos y morteros, por las razones que se explicarán más adelante.

Por su parte, el material con tamaño superior a 50,8 mm, denominado piedra, puede a su vez llamarse rajón,

cuando el tamaño de sus partículas está comprendido entre 150 mm y 50,8 mm; y media zonga, cuando su tamaño está entre 150 mm y 300 mm, aproximadamente. Este material es empleado en la elaboración de concretos masivos o en concretos ciclópeos (concreto de agregado precolocado).

3.2.3 Clasificación por densidad

En la Tabla 3.2 se presenta la clasificación del agregado por densidad.

Tabla 3.2. Clasificación de los agregados según su densidad

Clasificación del agregado	Densidad aproximada (kg/m ³)		Variedades más comunes de los agregados	Ejemplo de uso
	Agregado	Concreto		
Liviano	Agregado fino Menor que 1120 Agregado grueso menor que 880	1440 a 1840	Arcillas termo expandidas, pizarras o esquistos expandidos, escorias de horno, piedra pómez, perlita, diatomita	Concretos estructurales; aislamiento de ruido o calor; rellenos de bajo peso
Normal	1120 a 3300	2000 a 2600	Arena, grava, piedra triturada, Clínker, escoria de fundición	Estructuras de concreto de peso normal en general
Pesado	Mayor que 3300	Mayor que 2600	Barita, hierro, limonita, magnetita, limadura de acero, hematita	Concreto para macizos de anclaje; protección contra radiaciones, refugios antiaéreos

3.3 Funciones

3.3.1 Trabajabilidad

La arena, en conjunto con la pasta de cemento y cuando el concreto se encuentra en estado fresco, es el material encargado de lubricar el agregado grueso; en otras palabras, una buena manejabilidad de la mezcla depende en gran medida de la arena.

3.3.2 Economía (relleno)

Como se mencionó, generalmente los agregados son menos costosos que el cemento, razón por la que, hasta donde las propiedades técnicas del concreto lo permitan, se colocan en la mezcla la mayor cantidad posible de agregados, cumpliendo así una función de relleno.

3.3.3 Mitigación de fisuras

Como fue visto antes, durante el proceso de fraguado, la pasta experimenta pérdida de humedad originando contracción, la que a su vez genera esfuerzos de tracción acompañados por la aparición de fisuras. Al introducir agregados a la pasta, se crea una superficie de adherencia, de modo que los cambios en el volumen que originan la contracción disminuyen ostensiblemente, mitigando la formación de fisuras. Adicionalmente, la adherencia formada entre la pasta y los agregados, son convertidos en parte de la resistencia del concreto.

3.3.4 Resistencia

Las partículas de agregado tienen resistencia propia, que depende de la procedencia de la roca. Esta resistencia le es transmitida al concreto cuando son parte integral en el material. Por ello, es importante escoger partículas de agregado resistentes y duras.

3.3.5 Densidad

En ocasiones y tal como lo muestra la Tabla 3.2, el peso del concreto es un factor fundamental para la estabilidad de la estructura, función que le es transmitida utilizando la densidad de los agregados, por ser estos el mayor componente de la mezcla.

3.3.6 Durabilidad

Al igual que la resistencia, la durabilidad propia de los agregados le será transmitida al concreto, cuando sea sometido a exposiciones severas.

3.3.7 Estética - concretos arquitectónicos

Cuando se trata de concretos a la vista, la forma, textura, tamaño, color, cantidad y tonalidad de las partículas, influye en el acabado del material (Figura 3.4).



Figura 3.4. Ejemplos de concretos a la vista donde destaca el agregado †

3.4 Propiedades de los agregados

Por tratarse del componente mayoritario, los agregados deben tener características idóneas, acorde con las funciones del concreto. Las siguientes son las propiedades más importantes de los agregados y su influencia en el concreto.

3.4.1 Granulometría

Importancia

La **granulometría** está definida como la distribución en el tamaño de las partículas en una masa de agregados.

Tal como lo muestra la Figura 3.5, la elaboración de un buen concreto debe contener partículas de agregado con todos los tamaños, para que los espacios dejados por los más grandes sean ocupados por otros de menor tamaño, y así sucesivamente, lográndose minimizar los vacíos que serán llenados con la pasta de cemento, redundando en economía para la mezcla.

Una masa con el mínimo de vacíos trae otros beneficios, como mayor compacidad traducida en mayor resistencia; así mismo, hay menor permeabilidad aumentando la durabilidad. También se incrementa la superficie de adherencia, disminuyendo el riesgo de contracción. En estado fresco, se tienen mezclas cohesivas, que disminuyen el riesgo de segregación y exudación.

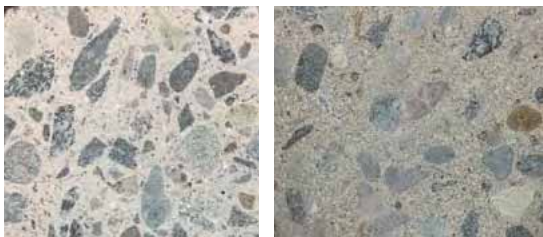


Figura 3.5. Concreto con buena distribución de agregados (izq.) Concreto "morterudo" (der.) †

Con lo anterior se infiere que la granulometría es, tal vez, la propiedad más importante de los agregados, y sus variaciones afectan seriamente la uniformidad entre una mezcla y otra. Es así como las arenas con alto contenido de material fino, requieren una mayor cuantía de cemento, haciéndolas más costosas (conocidas como mezclas "morterudas"); mientras que gravas muy gruesas y con poca arena, hacen mezclas poco trabajables (conocidas como mezclas "piedradas"). En general, se debe propender por granulometrías sin excesos ni defectos de cualquier tamaño, tal como lo enseña la Figura 3.6.



Figura 3.6. Buena granulometría de una masa de agregados para concreto †

Determinación de la granulometría

La determinación de la granulometría se hace mediante el proceso de tamizado, cuyo procedimiento estándar se describe en la NTC 77. Consiste en hacer pasar una muestra seca representativa de agregados, por una serie de tamices ordenados por tamaños de mayor a menor. El proceso se puede hacer de forma manual o mecánica (Figura 3.7).



Figura 3.7. Procedimiento de tamizado †

► 3 Agregados

Los tamices son mallas metálicas de aberturas cuadradas, montados sobre unos marcos que permiten el acople unos encima de otros, organizados de mayor a menor abertura. En Colombia, la norma NTC 32 los estandariza.

Su denominación se hace de acuerdo con el tamaño de la abertura y del sistema de unidades empleado. El Sistema Inglés lo hace en pulgadas para los tamaños grandes, y por el número de aberturas por pulgada lineal para las mallas menores a 1/4 de pulgada. Es así como, a modo de ejemplo, el tamiz de 1½ pulgadas (38 mm) tiene aberturas cuadradas de 1½ pulgadas de arista; y el tamiz N° 200 tiene 200 aberturas dentro de una pulgada lineal (Figuras 3.8 y 3.9).

El Sistema Internacional de Unidades designa los tamices por el tamaño en mm de la abertura en la malla. Para los tamaños menores a 1 mm, a veces los designa en micrómetros.

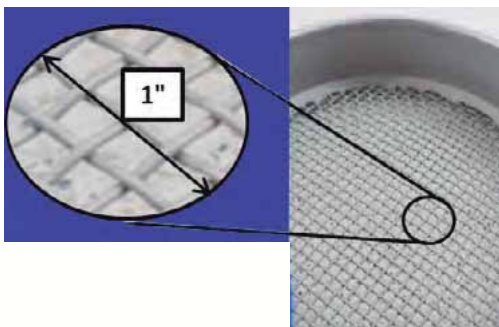


Figura 3.8. Representación del tamiz N° 4 †



Figura 3.9. Tamices para agregado grueso †

En Colombia, el conjunto de tamices empleados para realizar un análisis granulométrico de agregados para el concreto, es la denominada Serie Tyler o Americana (Tabla 3.3), estableciendo que la abertura de cualquier tamiz es aproximadamente la mitad de la abertura del tamiz inmediatamente superior; es decir, que cumplan con la relación 1 a 2. Sin embargo, algunos tamices no cumplen con ésta relación, pero son incluidos en la serie para tener un mejor control en dichos tamaños.

Tabla 3.3. Serie de tamices de agregados para concreto

Tamaño de agregado	Designación	
	Sistema Inglés	Sistema Internacional
Agregado grueso	6"	152 mm
	4"	100 mm ^A
	3"	75 mm
	2"	50 mm ^A
	1½"	37 mm
	1"	25 mm ^A
	¾"	19 mm
	½"	12,5 mm ^A
	3/8"	9,5 mm
	N° 4	4,76 mm
Agregado fino	N° 8	2,36 mm
	N° 16	1,18 mm
	N° 30	600 μm
	N° 50	300 μm
	N° 100	150 μm
	N° 200	74 μm

^A Tamices que no cumplen la relación 1 a 2

Con los resultados en el proceso de tamizado, puede realizarse el análisis granulométrico, tal como se explica a continuación y que aparece en la Tabla 3.4.

Las columnas 2 y 3 indica la serie de tamices utilizada, de mayor a menor en pulgadas y en milímetros.

Después de tamizar la muestra, se toma el material retenido en cada tamiz y se pesa. Cada valor se registra en la columna 3. Para la arena se emplean 2.000 g y en la grava 5.000 g, como establece el procedimiento de ensayo dado en la NTC 77. La Figura 3.10, muestra la apariencia de un agregado al separarlo en diferentes fracciones de tamaño.



Figura 3.10. Partículas retenidas en los diferentes tamices en un proceso de tamizado †

Ejemplo: Encontrar la curva granulométrica para un agregado grueso.

Luego de secar el material al horno, hasta masa constante, se procede a tamizarlo según las indicaciones de la norma. Se registran como se muestra en la Tabla 3.4.

Se calcula cada uno de los pesos retenidos como porcentaje retenido del peso total de la muestra y se relaciona en la columna 4; por ejemplo, para el tamiz de 19

mm, el porcentaje retenido es:

$$\begin{aligned} \% \text{Retenido} &= (950/5000) * 100 \\ \% \text{Retenido} &= 19 \% \end{aligned}$$

Ecuación 3.1

En la columna 5 se registra el porcentaje retenido acumulado de cada tamiz; por ejemplo, el porcentaje retenido acumulado hasta el tamiz de 25 mm, es:

$$\% \text{Retenido acumulado} = 0 + 1 + 18 = 19 \%$$

Ecuación 3.2

La columna 6 corresponde al % acumulado que pasa, calculado como la diferencia entre 100 y el % retenido acumulado. De este modo y siguiendo con el ejemplo, el porcentaje que pasa el tamiz de 12,5 mm será:

$$\% \text{ Pasa} = 100 - 70 = 30 \%$$

Ecuación 3.3

Tabla 3.4. Resultados de un análisis granulométrico en un agregado grueso

Tamiz		Peso retenido, g	% retenido	% retenido acumulado	% Pasa
mm	Pulgadas				
50	2	0	0	0	100
38	1 ½	50	1	1	99
25	1	900	18	19	81
19	¾	950	19	38	62
12,5	½	1.600	32	70	30
9,5	3/8	500	10	80	20
4,76	N° 4	900	18	98	2
Fondo		100	2	100	0
Total		5.000			

Se acostumbra representarlos en forma gráfica, caso en el cual son denominadas curvas granulométricas. Las gráficas se representan en un plano cartesiano semi-logarítmico, colocándose en las ordenadas (escala aritmética) el porcentaje que pasa; y las abscisas, las aberturas del tamiz (escala logarítmica).

De las curvas granulométricas se puede apreciar la distribución de tamaños en una masa de agregados. Permite conocer las deficiencias o excesos de un tamaño particular, y determinar si la granulometría cumple o no

con las especificaciones. Dada la dificultad y complejidad de ajustarse a una línea granulométrica, todas las especificaciones de esta clase suelen darse en un rango con límite superior e inferior, en el cual, las partículas de agregado resultan adecuadas. La Figura 3.11, muestra, a manera de ejemplo, los rangos granulométricos establecidos para un agregado grueso y otro para la arena.

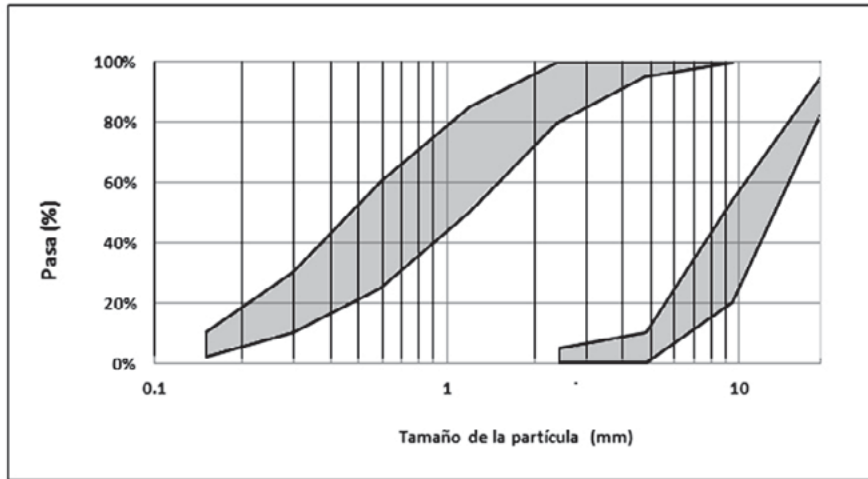


Figura 3.11. Rangos de gradación para arena y agregado grueso con tamaño máximo nominal TMN de 19 mm (3/4")

Factores derivados de un análisis granulométrico

Algo importante para destacar sobre el análisis granulométrico, son los parámetros derivados de él y las aplicaciones dadas.

Tamaño Máximo (TM): Aplica para el agregado grueso. Es la abertura del menor tamiz que permite el paso del 100% de la muestra.

Como su nombre lo indica, corresponde al tamaño de las partículas más grandes que hay en la masa de agregados, que en algunos casos puede ser solamente una. Es así como, de la Tabla 3.4, el TM del agregado es de 50 mm (2 pulgadas). El TM es un factor usado para el diseño de mezclas de concreto cuando se trata de agregados de granulometría continua, y se emplean los conceptos empleados por Fuller - Thompson y Bolomey (ver Capítulo 8 - Diseño de Mezclas).

Tamaño máximo nominal (TMN): Se define como el tamiz que le sigue en abertura mayor a la de aquel, cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más.

El TMN representa mejor el promedio de las partículas más grandes pues, como se mencionó, el TM puede ser tan solo una partícula y no representa el promedio de las partículas más grandes en la masa de agregados. Para el caso del ejemplo mostrado en

la Tabla 3.4, El TMN es de 38 mm (1½ pulgadas).

Como puede observarse, el TM y el TMN pueden no coincidir, debido a que este último indica el promedio de partículas más grandes en su fracción gruesa; mientras que el TM tan sólo da una idea de las partículas más grandes. Por esta razón, la mayoría de las especificaciones granulométricas están dadas en función del TMN.

Módulo de finura (MF): Es la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados en la serie de tamices especificados que cumplen con la relación 1:2, desde el tamiz 150 µm (N° 100) hasta el tamiz 4,75 mm (N° 4) y dividido por 100.

En Colombia, el módulo de finura (MF) es un parámetro que aplica para la arena. El valor del MF sirve para determinar qué tan fina o gruesa es una arena. La arena adecuada para producir concreto debe estar entre 2,3 y 3,1, rangos que establecen las normas NTC 174 e INVÍAS. Valores cercanos a 2,0 (entre 1,8 y 2,2) indican que está tratándose de una arena fina; cerca de 2,5 (entre 2,3 y 2,7) de una arena media; y alrededor de 3,0 (entre 2,8 y 3,2) trata de una arena gruesa. Para el caso

de los morteros, el valor del MF recomendado puede estar entre 1,8 y 2,2.

En la práctica, un número infinito de gradaciones pueden tener un mismo valor de MF, razón por la que este parámetro solo debe usarse en la comparación de materiales cuya gradación sea similar, es decir, para medir variaciones de arenas procedentes de una misma fuente. Las normas NTC 174 e INVÍAS emplean el MF como verificación periódica, estableciendo que no debe variar en más de 0,2, con respecto al obtenido en la gradación escogida para el diseño de la mezcla.

El MF también es muy empleado como parámetro para el diseño de mezclas, toda vez que algunos factores han sido calculados con base en su valor.

Ejemplo: Calcular el módulo de finura de dos arenas, una denominada media y otra gruesa.

Luego de realizar el muestreo, se secaron las arenas en el horno, hasta lograr masa constante. Posteriormente se tamizaron de acuerdo con el procedimiento dado por la norma.

La Tabla 3.5. presenta el cálculo del MF. Es de anotar que, para el ejemplo, la serie de tamices no incluye en los cálculos los tamaños de 25 mm (1") ni de 12,5 mm (½").

Tabla 3.5. Cálculo del módulo de finura

Tamiz		Tipo de arena	
mm	Pulgadas	Media	Gruesa
9,5	3/8		0
4,76	N° 4	0	4
2,36	N° 8	9	15
1,18	N° 16	28	37
0,600	N° 30	49	62
0,300	N° 50	79	85
0,150	N° 100	96	98
Módulo de finura (MF)		2,61	3,01

Granulometrías continuas

Si del análisis granulométrico se observa que la masa de agregados contiene todos los tamaños de grano, desde el mayor hasta el más pequeño, tiene una curva granulométrica continua.

Una granulometría continua es importante porque permite un adecuado empaquetamiento para lograr la máxima densidad, lo que se traduce en mejor resistencia,

menor permeabilidad, mayor economía y mayor durabilidad, entre otras propiedades en el concreto.

Granulometrías discontinuas

Una granulometría es discontinua cuando le faltan, han sido reducidos o eliminados algunos tamaños intermedios de grano. En concretos normales, las granulometrías discontinuas no son deseables pues producen concretos poco trabajables, propensos a la segregación o a la exudación, con baja resistencia, permeables y baja durabilidad.

No obstante, es posible requerir concretos especiales en los que hay que evitar ciertos tamaños para que cumplan con su función. Tal es el caso de algunos concretos arquitectónicos, en los que se requiere que los agregados tengan un tamaño uniforme; o como el caso del concreto permeable, donde se restringen los tamaños finos (Figura 3.12).



Figura 3.12. Concreto sin finos para elaboración de concreto permeable †

Para efectos prácticos, las especificaciones granulométricas contemplan una zona definida por dos límites (superior e inferior), dentro de los cuales es aceptable cualquier granulometría. En el caso de la normas NTC 174 e INVÍAS se establece los rangos granulométricos para el agregado fino dados en la Tabla 3.6. Para el agregado grueso, la NTC proporciona los rangos de la Tabla 3.7 en función del TMN, mientras que la norma INVÍAS lo hace con los rangos de la Tabla 3.8.

Tabla 3.6. Límites granulométricos establecidos para el agregado fino (3.3)

Tamiz		% Pasa	
mm	Pulgadas	Límite inferior	Límite superior
9,5	3/8	100	100
4,76	N° 4	95	100
2,36	N° 8	80	100
1,18	N° 16	50	85
0,600	N° 30	25	60
0,300	N° 50	5	30
0,150	N° 100	0	3

Para el caso del agregado fino, la NTC 174 establece además las siguientes precisiones como parte de la especificación:

El porcentaje mínimo dado en la Tabla 3.6 para el material que pasa los tamices de 300 μm , y 150 μm , se puede reducir a 5 y 0 respectivamente, si la mezcla de concreto en donde se van a usar tiene aire incorporado, con un contenido de cemento mayor a 297 kg/m^3 , o en un concreto sin aire incorporado, con un contenido de cemento mayor a dicha cantidad, o si es usado un aditivo o adición mineral aprobado para suplir la deficiencia en el porcentaje que pasa estos tamices.

No se permite que en cualquier tamiz pase el 45% del agregado fino ni quedar retenido en el siguiente tamiz.

El agregado fino que no cumpla los requisitos de gradación y módulo de finura establecidos, se puede aceptar siempre y cuando exista evidencia (registros) de comportamiento aceptable del concreto elaborado con este material. En el evento que no existan registros, se debe ensayar el agregado fino para determinar su desempeño en mezclas de concreto. Para el efecto, se elabora una mezcla con el agregado fino en consideración y otra con agregado fino de buena calidad demostrada; se someten las muestras bajo las mismas condiciones y se acepta el agregado fino en cuestión, si el resultado obtenido es, por lo menos, igual a la mezcla testigo de calidad demostrada.

Para el caso de despachos continuos de agregado fino de una determinada fuente, el módulo de finura no debe variar en más de 0,2 del módulo de finura tomado como base, el cual debe ser el típico de la fuente. El módulo de finura base puede ser cambiado siempre que lo acepte el cliente.

Tabla 3.7. Requisitos de gradación NTC 174 para el agregado grueso (3.3)

N° del Tamaño del agregado	TMN: Tamices de abertura cuadrada mm	Material que pasa cada uno de los siguientes tamices, en mm (%)												
		100	90	75	63	50	37,5	25,0	19,0	12,5	9,5	4,75 (N° 4)	2,36 (N° 8)	1,18 (N° 16)
1	90 a 37,5	100	90 a 100	-	25 a 60	-	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
2	63 a 37,5	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-	-
3	50 a 25,0	-	-	-	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-	-
357	50 a 4,75	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	-	0 a 5	-	-
4	37,5 a 19,0	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-
467	37,5 a 4,75	-	-	-	-	100	95 a 100	-	35 a 70	-	10 a 30	0 a 5	-	-
5	25,0 a 12,5	-	-	-	-	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	0 a 5	-	-
56	25,0 a 9,5	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	-	-
57	25,0 a 4,75	-	-	-	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5	-
6	19,0 a 9,5	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	25 a 55	0 a 15	0 a 5	-	-
67	19,0 a 4,75	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5	-
7	12,5 a 4,75	-	-	-	-	-	-	-	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	-
8	9,5 a 2,36	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

Tabla 3.8. Requisitos de gradación Norma INVÍAS para el agregado grueso

Tipo de gradación		Tamiz, mm (pul)								
		63 (2 ½")	50 (2")	37,5 (1 ½")	25 (1")	19 (¾")	12,5 (½")	9,5 (3/8")	4,76 N°4	2,36 N°8
		% Pasa								
AG 1	Fracción 1 2 ½" - 1"	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	-	0 a 5	-	-	-
	Fracción 2 ½" - N°4	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5
AG 2	Fracción 1 2" - ¾"	-	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	-	0 a 5	-	-
	Fracción 2 1" - N°4	-	-	-	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10	0 a 5
AG 3	1 ½" - N°4	-	-	100	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	0 a 5

Forma y textura superficial de los agregados

La forma y la textura superficial son propiedades físicas de la partícula que dependen, fundamentalmente, de la procedencia. Los agregados naturales provenientes de fuentes aluviales, por el proceso de arrastre y acción del agua toman una forma aproximada a la redondeada y tienen una textura lisa. Por su parte, los agregados triturados tienen forma angulosa y textura rugosa.

En estado fresco, los concretos con agregados redondeados y lisos tienen mayor manejabilidad que los elaborados con partículas angulosas y rugosas, dada su condición natural de mejor desplazamiento. Esto conduce a concretos con menores consumos de agua y cemento.

Así mismo, las partículas redondeadas tienden a acomodarse mejor en un determinado volumen, consiguiendo mayores densidades (en un volumen determinado puede haber hasta un 25% más de agregados redondeados sueltos, que partículas con forma cúbica).

Además, cuando es bombeado el concreto, se prefieren estos agregados debido a que presentan un menor rozamiento entre sus partículas y las paredes de la tubería. No obstante, su adherencia con la pasta de cemento es poca, por lo que la resistencia en el concreto se reduce.

En estado endurecido, las partículas angulosas y rugosas tienen una mejor superficie de adherencia con la pasta de cemento. En particular, la resistencia a la flexión adquiere un notorio beneficio, de ahí que en las

especificaciones de los agregados para pavimentos de concreto, se exija que al menos una cara del agregado sea fracturada.

Con relación a la forma, hay partículas largas, planas y lajudas, que también interfieren en las propiedades del concreto. Existen diferentes maneras para definir las, siendo una de ellas la siguiente.

Partícula larga (PL): una partícula larga es aquella cuya relación entre la longitud (l) y el ancho (a), es mayor a 1,5, o sea:

$$PL: l/a > 1,5 \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Partícula plana (PP): las partículas planas son aquellas cuya relación entre el espesor (e) y el ancho (a), es menor a 0,5 (Ver figura 3.13), es decir:

$$PP: e/a < 0,5 \quad \text{Ecuación 3.5}$$



Figura 3.13. Esquema de una Partícula larga y plana

Partícula lajuda

Las partículas lajudas también son conocidas como “lajas” (Figura 3.14). Son aquellas que además de ser planas son largas. Generalmente son pizarras que por su estructura laminar son débiles a los esfuerzos de flexión. Tienden a ubicarse horizontalmente en el concreto (Figura 3.15), evitando la salida del aire, lo que genera bolsas en la parte inferior y en consecuencia zonas de baja resistencia.



Figura 3.14. Ejemplos de partículas lajudas

Así mismo, son partículas que se tornan difíciles de manejar dentro del concreto fresco, requiriendo agua de mezcla en mayores cuantías, afectando la resistencia, principalmente a la flexión.

Por lo anterior, es claro que las partículas lajudas deben evitarse en el concreto, siendo limitadas por las normas a un contenido máximo de 15% en la masa total del agregado.

3.4.3 Porosidad

La porosidad es una propiedad de las partículas del agregado que depende de la roca de procedencia. Tiene una influencia importante en las características de los agregados, siendo determinante en su

calidad, pues a mayor cantidad de poros, el agregado natural es menos denso, menos resistente, menos durable, tiene mayor capacidad para absorber agua, características que influyen directamente en las propiedades del concreto.

En general, los poros de una partícula de agregado pueden ser internos o externos y presentan un amplio rango en sus tamaños, siendo algunos detectados a simple vista, y otros solo a través del microscopio, como los mostrados en la Figura 3.16. Los poros determinan la capacidad para absorber agua, y en consecuencia, el grado de humedad; también es importante para la adherencia con la pasta de cemento.

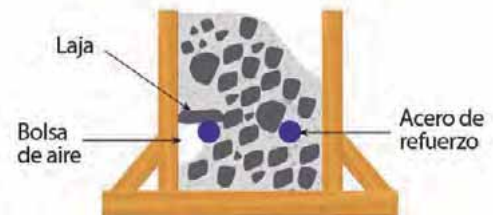


Figura 3.15. Efecto de partículas lajudas en el concreto

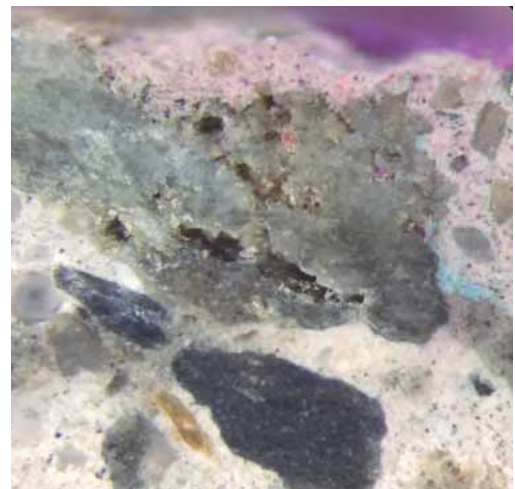


Figura 3.16. Micro porosidad en una partícula de agregado

3.4.4 Densidad

Una de las propiedades que depende de la porosidad en los agregados es la densidad, definida como la relación entre la masa y el volumen que ocupa.

$$D = M/V \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde:

D: densidad del agregado

M: masa seca del agregado

V: volumen

Densidad: relación entre la masa y el volumen que ocupa un sólido. Antes denominado peso unitario. Para materiales porosos que pueden ser llenados con agua, se utilizan palabras adicionales tales como absoluta o aparente. Y si es en relación con otro material, generalmente el agua, se denomina relativa

El valor de la densidad está en dependencia con el volumen que se tome, es decir, si se incluye o no el de los poros. Desde este punto de vista, hay dos tipos de densidad, absoluta (nominal) y la aparente.

Densidad absoluta (nominal)

Es la relación entre la masa y el volumen de los sólidos, sin incluir el volumen que ocupan los poros de las partículas (internos y externos). Esta propiedad no tiene mucha aplicación en el campo de la tecnología del concreto.

Densidad aparente

En este caso, para determinar la densidad, se toma el volumen de la porción sólida, más el volumen de poros impermeables. Es decir, no se tiene en cuenta el volumen de los poros permeables.

Esta propiedad reviste importancia, toda vez que los poros de las partículas ocupan un volumen dentro de la masa de concreto; por ello, su valor es empleado en el diseño de mezclas y para el cálculo de la cantidad de agregado requerido para un volumen unitario de concreto.

La densidad aparente de los agregados de densidad normal puede estar entre 2.400 y 2.800 kg/m³. El procedimiento para su determinación se da en la NTC 176 para agregados gruesos, y en la NTC 237 para agregados finos.

Absorción y humedad

Otras dos propiedades, que dependen directamente de la porosidad en los agregados, son la capacidad absorbente de agua y la humedad. Los poros externos de los agregados pueden tener humedad en algún grado, que depende de la capacidad absorbente de las partículas, es decir, la cantidad y tamaño de los poros. Los agregados en contacto con el agua retienen bastante humedad en la superficie de las partículas, especialmente la arena. La norma INVÍAS limita la absorción en el agregado grueso al 4%. Dado que el contenido de humedad en el agregado depende de las condiciones climáticas, es necesario estar midiendo con frecuencia su cuantía.

Absorción: Cantidad de agua que ingresa en un material poroso, a través de sus poros permeables. También se refiere al incremento en la masa, por la penetración de líquidos en los poros permeables

La capacidad de absorción está determinada por los procedimientos descritos en las NTC 176, para el agregado grueso y NTC 237, en el agregado fino.

La absorción y la humedad en los agregados son factores importantes al diseñar mezclas de concreto, puesto que las tablas para calcular la cantidad de agua de mezclado, se asume que los agregados se encuentran en estado SSS. Pero, con base en lo expuesto, pueden necesitar una cantidad mayor de agua o, por el contrario, pueden aportarla, razón por la cual es necesario realizar un ajuste por humedad, tema tratado detalladamente en el "Capítulo Diseño de Mezclas".

Las partículas de agregado pueden tener alguno de los siguientes cuatro estados de humedad, (Figura 3.17).



Figura 3.17. Estados de humedad de los agregados*

Totalmente seco al horno

Este estado se logra únicamente en el laboratorio mediante un proceso de secado al horno a 110 ° C, hasta que los agregados tengan un peso constante, generalmente a las 24 horas.

Parcialmente húmedo

Se logra mediante exposición de las partículas de agregado al aire libre, normalmente en días no lluviosos.

Saturado y superficialmente seco (SSS)

El estado SSS es el ideal. Consiste en que los agregados tienen todos sus poros saturables llenos de agua, pero superficialmente están secos. Es prácticamente imposible que se dé naturalmente en los agregados al aire libre, lográndose solo en el laboratorio.

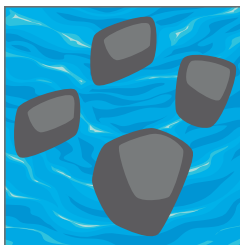
Húmedo y con agua libre

Todos los poros permeables de agregado están llenos de agua y además existe agua libre superficial. Se presenta en agregados expuestos a la lluvia.

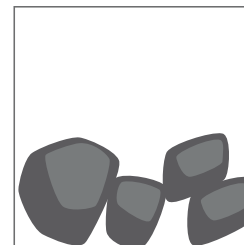
3.4.6 Efecto de hinchamiento de la arena

Un aspecto relacionado con la humedad de los agregados y específicamente con la arena, es el fenómeno de hinchamiento, abultamiento o aumento de volumen aparente.

El hinchamiento se presenta cuando los granos de arena entran en contacto con la humedad, la cual ejerce una fuerza entre partícula y partícula, tendiente a separar sus granos (Figura 3.18). La tensión superficial aumenta con la humedad y es mayor en la medida que la finura de la arena es menor, así que los granos tienden a separarse, ocasionando un incremento aparente de volumen. Esta tensión es máxima en humedades entre el 5% y el 8%. En el evento que la humedad siga en incremento, la tensión superficial empieza a ceder y con ella decrece el volumen aparente, tal como lo enseña la Figura 3.19.



En un volumen de arena y agua, la tensión superficial aparta los granos.



En ausencia de agua, los granos ocupan un menor volumen.

Figura 3.18 Esquema de la separación por tensión superficial del agua para producir el efecto de hinchamiento*

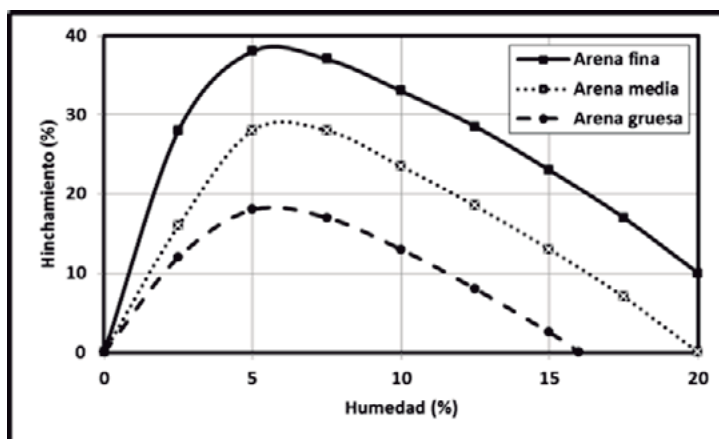


Figura 3.19. Hinchamiento del agregado fino para diferentes tamaños de arena y grados de humedad (3.11)

El efecto de hinchamiento de la arena es importante cuando la dosificación se realiza por volumen, pues dependiendo de la finura y la humedad, se introduce a la mezcla menor cantidad de arena, complementada con una cantidad de agua no prevista en el agua de mezclado, lo cual trae como consecuencia baja resistencia y durabilidad en el concreto.

Por otro lado, el efecto del hinchamiento también influye durante los procesos de compra, transporte y almacenamiento, toda vez que pueden verse afectados al subestimar la cantidad real del material. En el caso específico de la compra, cuando llega la arena húmeda a la obra, tiene un volumen determinado, y al drenarse, otro menor.

Un método sencillo y rápido para medir este fenómeno, consiste en suponer que el volumen que ocupa una arena inundada con agua es el mismo que ocupa la arena seca. En una probeta graduada (con capacidad entre 1 y 2 litros), se mide el volumen inicial de una muestra de arena; se agrega agua sobre la arena hasta inundarla, girando la probeta para eliminar las burbujas de aire. La arena se acomoda disminuyendo su volumen. La diferencia de volumen inicial y final se divide por el volumen de la arena inundada y se multiplica por 100, obteniéndose el porcentaje de hinchamiento.

Densidad suelta (DS)

La masa unitaria (MU) de los agregados era el término usado tradicionalmente para describir la relación

entre el peso de una muestra de agregados y el volumen que este ocupa dentro de un recipiente de volumen conocido. Aunque algunos consideran que los términos peso unitario, densidad o densidad volumétrica, resultan más apropiados, se ha adoptado recientemente el término densidad suelta.

Para el caso, el cálculo de la densidad incluye el volumen del aire que se encuentra entre las partículas y el volumen que ocupan las partículas. Es decir:

$$DS = M/V \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Donde:

DS: densidad suelta del agregado
M: masa seca del material
V: volumen del recipiente

La densidad suelta indica el grado de acomodamiento de las partículas en un recipiente. Entre mejor se acomoden, menor será la cantidad de vacíos entre partículas, lo que representa menor cantidad de pasta (mayor economía), pues habrá menor cantidad de espacios a ser llenados. Es un factor importante, porque mide la aptitud del agregado para ser utilizado en la producción de concreto.

La densidad suelta depende de la composición mineralógica, granulometría, forma, textura, porosidad y tamaño de los agregados. Para una misma composición mineralógica, entre mayor sea el valor de la masa unitaria significa que hay mayor cantidad de material.

Su determinación se encuentra relacionada en la NTC 92. El valor varía dependiendo del grado de compactación al cual se someten los agregados durante el ensayo, encontrándose valores característicos entre 1.200 y 1.750 kg/m³ en agregados naturales. Se definen dos tipos de densidades, la no compacta y la compacta.

Densidad suelta no compacta (MUS)

Se obtiene dividiendo la masa del material entre el volumen que ocupa, cuando se llena el recipiente completamente, sin compactación. Este valor se usa para la compra, manejo, transporte y almacenamiento de los agregados, debido a que tales procesos se hacen con el material suelto. Anteriormente se denominaba masa unitaria suelta (MUS).

Densidad suelta compacta (MUC)

Se obtiene mediante compactación de la muestra, para incrementar la acomodación de las partículas. El valor obtenido se usa para determinar el volumen absoluto que ocupan los agregados en el diseño de mezclas, por cuanto van a estar sometidos a una compactación durante el proceso de colocación en la estructura. Anteriormente se denominaba masa unitaria compacta (MUC).

Resistencia a la compresión

Como se ha mencionado, las partículas tienen resistencia propia. Para un concreto con resistencia normal, el agregado generalmente tiene una resistencia superior a la pasta endurecida. Cuando las partículas fallan antes que la pasta, la resistencia del agregado no tiene tanta importancia. Por el contrario, para concretos de alta resistencia sucede el efecto inverso, es decir, la pasta tiene mayor resistencia que los agregados siendo necesario disminuir su TMN.

Las fallas por resistencia en los agregados pueden ser causadas por una estructura pobre o porque se han sido inducidas fallas a las partículas durante el

proceso de explotación y beneficio. Esto sucede cuando se hace la extracción de la mina por voladura, donde se inducen microfisuras, o por un inadecuado proceso de trituración.

La resistencia del agregado raramente se mide y las normas no establecen valores mínimos. No obstante, el procedimiento de la norma ASTM C170 permite prever el comportamiento de los agregados en cuanto a su resistencia; según algunas mediciones, puede variar entre 66 y 275 MPa (660 y 2750 kg/cm²).

Los agregados también son compresibles (lográndose medir su módulo de elasticidad) y se pueden contraer a causa de la pérdida de humedad, características que le son transmitidas al concreto.

Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión, desgaste o dureza de un agregado, es una propiedad importante cuando se emplea en la elaboración de concretos sometidos a esfuerzos de abrasión o roce permanentemente, como en los pisos industriales o los pavimentos rígidos.

La determinación de la resistencia a la abrasión se realiza mediante la "Máquina de los Ángeles" o con el Micro-Deval. El primero, descrito en las NTC 90 y 98, para agregados gruesos, consiste en colocar muestra en un tambor cilíndrico de acero, que gira en torno a un eje horizontal. Al tambor se le añade una carga de bolas de acero y se pone a girar. La fricción entre el agregado, las bolas y las paredes del tambor, desgastan las partículas. El efecto se mide por la diferencia entre la masa inicial de la muestra seca y la masa del material luego del proceso, expresado como porcentaje de la masa inicial. La norma INVÍAS establece que el máximo desgaste permitido en agregado para pavimentos es del 40%, cuando el ensayo aplica 500 revoluciones, y al 8% para 100 revoluciones.

La prueba con el Micro-Deval es similar, la diferencia consiste en que la abrasión se

hace en presencia de agua durante 2 horas a 100 rpm, tiempo después del que la muestra se lava, se seca al horno y se determina la cantidad de material que pasa el tamiz de 1,18 mm (N° 16). El resultado se expresa como porcentaje de la masa original de la muestra. La norma INVÍAS establece como máximo 30% para agregado grueso empleado para pavimento.

Resistencia al impacto o tenacidad

La resistencia al impacto o tenacidad está muy relacionada con el manejo del agregado y el mezclado del concreto, toda vez que si las partículas son débiles ante las acciones que se presentan durante estos procesos, la granulometría se puede alterar. Se induce durante procesos inadecuados de trituración o por extracción con voladura en la mina.

Es un factor de calidad de los agregados. Un valor bajo indica que los agregados no son idóneos para la producción de concreto. Las normas colombianas no contemplan un ensayo para su determinación, ni especifican valores mínimos, pero de requerirse, se pueden adaptar las normas británicas BS 812, parte 3 y en la BS 882.

Reacción álcalis-agregado

Anteriormente se consideraba a los agregados como materiales inertes, que no reaccionaban químicamente. No obstante, ciertos agregados contienen elementos que pueden reaccionar con la pasta de cemento, como la sílice activa y los carbonatos.

La reacción álcalis-sílice (RAS) fue detectada hacia finales de 1930. Se presenta cuando los agregados que tienen sílice reactiva, reaccionan con los hidróxidos alcalinos derivados de los álcalis del cemento (Na_2O y K_2O) o del ambiente, formando geles expansivos en presencia de agua, que generan esfuerzos de tracción internos, capaces de romper el concreto con el tiempo.

Para que ocurra una RAS, se requiere que estén presentes tres factores:

- Sílice reactiva en el agregado.
- Una solución altamente alcalina.
- Suficiente humedad.

La RAS es una reacción compleja y puede tardar varios años en manifestarse. En la Figura 3.20, la PCA enseña la forma cómo se presenta, en un estado muy avanzado de deterioro.



Figura 3.20. Manifestación de la reacción álcalis-sílice (3.11)

Existen varias formas para prevenirla. Una es impermeabilizar la estructura, de modo que los ciclos de humedad y secado no generen migración de iones alcalinos entre la zona húmeda y la seca, favoreciendo y agravando la reacción. El uso de materiales cementantes suplementarios como las puzolanas, cenizas, escorias de alto horno y el metacaolín, es otra alternativa, pues reaccionan con los hidróxidos formando productos cementantes, evitando que reaccionen con la sílice de los agregados.

Los agregados volcánicos normalmente son los más dañinos, como las tobas, el ópalo (amorfo), la calcedonia (criptocristalina venosa), la tridimita (cristalina), los vidrios volcánicos, la dacita y la andesita, entre otros.

Cuando exista duda sobre la posible presencia de sílice reactiva en los agregados y la eventual formación de RAS, es necesario determinar su inocuidad o posible potencial reactivo. Para su diagnóstico, es recomendable utilizar simultáneamente varios métodos. El más confiable en la actualidad es el denominado método en prismas, pero su realización requiere mucho tiempo. Por ello es necesario recurrir al método acelerado en barras, que permite tomar decisiones rápidas. Ambos métodos son complementados con el estudio petrográfico de los agregados, orientados a verificar la presencia de minerales reactivos. Los métodos de ensayo, como el químico y el de barras, no son recomendados. La Tabla 3.9 se muestra un resumen de los métodos desarrollados para medir la RAS.

Tabla 3.9. Resumen de los métodos para medir la RAS (3.12)

Ensayo	Qué determina	Uso en diseño y/o especificación	Confiability	Tiempo para los resultados
Método de las barras ASTM C227 NTC 3828	Mide la expansión de un cemento de alto álcalis particular ($Na_2O_{eq} > 0,8\%$) con un agregado particular	Uso limitado. Solo entrega información del cemento y agregados particulares evaluados	Baja. Norma anulada	6 meses
Método de las barras aplicado a cementos tipo "R" ASTMC595 C1157	Clasificación de un cemento como "tipo R" o de baja reacción álcalis-sílice	Uso limitado. Es un control parcial del riesgo de reacción álcalis-sílice. No evalúa otras fuentes de álcalis (internas y externas). En todo caso aplicar las recomendaciones adicionales de la guía para reducir el riesgo de la reacción álcalis-sílice	Baja. Norma C227 anulada	2 meses
Método químico rápido ASTM C289 INV 234-13 NTC 175	Clasificar un agregado como inocuo, potencialmente dañino o dañino	Uso limitado. Solo como un indicador inicial de desempeño de un agregado, pero no recomendada para diseño. Los límites de clasificación de los agregados son arbitrarios	Baja. Norma anulada	1d
Método acelerado en barras ASTM C1260	La reactividad de los agregados y la cantidad de cementantes complementarios para mitigar la reacción	Permiten clasificar los agregados como inocuos, potencialmente reactivos o reactivos por un método de desempeño	Adecuada ^A	16 d
Método acelerado de mitigación en barras ASTM C1567	La cantidad de cementantes complementarios para mitigar la reacción	Diseñar la mitigación de la reacción álcalis-sílice por un método de desempeño	Adecuada ^A	16d
Método en prismas ASTM C1293	La reactividad de los agregados y la cantidad de cementantes complementarios para mitigar la reacción	Permite clasificar los agregados como potencialmente dañinos o inocuos. Usado con puzolanas, permite diseñar la mitigación de la reacción álcalis-sílice	Adecuada ^A	12 meses (diagnóstico de los agregados) 24 meses (diseño de la mitigación)
Petrografía de los agregados ASTM C295	Presencia de minerales reactivos: ópalo, calcedonia, cuarzos microcristalinos, policristalinos o criptocristalinos	Permite corroborar la presencia de minerales conocidos por ser reactivos	Adecuada ^A	7d (Estimado)
Diagnóstico de agregados por estudios de campo. ASTM C823	En obras en servicio, la presencia de gel de reacción álcalis-sílice, mineralogía de los agregados, tipo de cemento usado y uso de cementantes complementarios	Permite uso o especificación de mitigación en los concretos nuevos que serán elaborados exactamente con los mismos constituyentes evaluados. Se tiene en cuenta que dichos concretos evaluados no presentaron reacción álcalis-sílice, en un tiempo de servicio equivalente al de la obra nueva	Adecuada ^A	Varios meses

A: Estos ensayos son complementarios en sí

La norma INVIAS de 2014 pide realizar un análisis químico de reactividad de acuerdo con el procedimiento dado en la ASTM C285 (anulada por la ASTM en 2016), donde se verifica la presencia de sílice disuelta (SiO_2) y la reactividad alcalina del agregado (R). Se tiene que el agregado es potencialmente reactivo, sí:

$$\begin{aligned} \text{SiO}_2 &\leq R, \text{ cuando } R \geq 70, \text{ o} \\ \text{SiO}_2 &\leq 35 + 0,5 R, \text{ cuando } R < 70 \end{aligned}$$

En Colombia varias obras han tenido que construirse con agregados potencialmente reactivos. Para mitigar o inhibir la reacción, se investigaron y emplearon materiales cementantes suplementarios como metacaolín, microsílíce y puzolanas. A falta de mapas que identifiquen dónde se encuentran los agregados reactivos en Colombia toda fuente debe ser caracterizada.

Reacción álcalis roca de carbonato - RAC- es similar a la desarrollada por la RAS, que también se forma en presencia de humedad, pero con agregados de origen dolomítico o calizo-dolomítico.

Este tipo de reacción raras veces está presente, entre otras razones, porque los componentes específicos que desarrollan la reacción son muy poco frecuentes. Es necesario que la dolomita presente una textura determinada en forma de cristales relativamente grandes, dispersos entre arcillas y calcita.

Los procedimientos desarrollados por la ASTM normalmente empleados para su determinación, son: ASTM C586, método del cilindro de roca, ASTM C295, examen petrográfico, y ASTM C1105, ensayo en el prisma de concreto.

Adherencia química de la pasta y el agregado

Se ha encontrado que algunos agregados pueden desarrollar adherencia entre la superficie de las partículas y la pasta de cemento, gracias a una reacción química entre los dos materiales. Este fenómeno es conocido como Epitaxia. En la actualidad no se ha desarrollado un método para medirla, pues es muy poco lo que se conoce al respecto.

3.4.12 Sanidad del agregado

Para usar los agregados en la elaboración de concreto, deben tener la capacidad de mostrar resistencia a los cambios excesivos de volumen, debido a los cambios térmicos, a los ciclos de hielo-deshielo, y a los cambios por humedad - secado. Esta propiedad en los agregados es conocida como sanidad.

Generalmente, los agregados naturales volcánicos tie-

nen buena sanidad, toda vez que son formados mediante altas temperaturas y sometidos a efectos de intemperie como los mencionados.

La norma ASTM C880 describe el procedimiento para determinar la sanidad en un agregado de granulometría conocida, sumergiéndola en una solución saturada en sulfato de sodio o de magnesio, previamente secados en el horno, para que las sales formadas en los poros aumenten la presión interna en el agregado, llegando a fracturarlos. El análisis granulométrico posterior a determinados ciclos por sometimiento a las sales, da como resultado el grado de sanidad. Esta prueba simula la presión por la formación de hielo. También las presiones asociadas a cambios de temperatura, por ejemplo, durante el fraguado; o los esfuerzos internos asociados a contracción debidos a los cambios de humedad.

La norma INVÍAS, establece que la máxima pérdida permitida en el ensayo de solidez en sulfatos para agregados gruesos es del 10%, cuando se realiza en sulfato de sodio, y el 15%, cuando se hace en sulfato de magnesio. La NTC 174 limita los valores al 18% y al 12%, cuando es en sulfato de magnesio y en sulfato de sodio, respectivamente.

3.5 Sustancias perjudiciales

Los agregados pueden contener sustancias o partículas que afectan nocivamente las propiedades del concreto, como el proceso de hidratación, la resistencia, la durabilidad y la estética.

3.5.1 Materiales finos

Como se mencionó, en los agregados para concreto se consideran materiales muy finos, aquellos que pasan el tamiz de $74 \mu\text{m}$ (N° 200), refiriéndose especialmente a la arcilla, el limo, y el polvillo producido por la trituración.

El limo y la arcilla tienen como origen la explotación de fuentes naturales. El polvo de trituración es producido al triturar partículas grandes, para lograr los diferentes tamaños requeridos.

En general, este material se presenta en forma de recubrimiento sobre las partículas grandes, interfiriendo en la adherencia con la pasta de cemento, con la consecuente disminución en la resistencia y en la durabilidad. El polvillo de trituration no es tan perjudicial como la arcilla y el limo. Por esta razón las normas son menos estrictas con su presencia.

Especial atención debe prestarse a la arcilla expansiva, dado que con los ciclos de humedad y secado crean movimientos de dilatación y contracción, generando esfuerzos de tracción en el concreto endurecido, que conduce a fisuración y el consecuente deterioro.

Otro problema que presentan las fracciones muy finas es su elevada superficie específica, pues conduce a mayores consumos de agua en la mezcla y, en consecuencia, a incrementos en las dosis de cemento para conservar la relación agua/cemento. Se han desarrollado diferentes pruebas para hallar su cantidad, siendo la más común el lavado de una muestra seca sobre el tamiz 74 μm , y en él se basa el procedimiento dado en la NTC 78. Otros métodos para determinar la cantidad de arcillas, están basados en el uso de azul de metileno, la difracción en los rayos X, o el análisis por hidrómetro.

Dado el carácter nocivo del material muy fino en los agregados, las normas limitan su cuantía, siendo más estrictas en agregados para estructuras sometidas a abrasión, como como sucede en los pisos industriales y pavimentos de concreto. La norma INVÍAS los limita a máximo 3%, mientras que la NTC 174 establece los valores relacionados en la Tabla 3.10.

3.5.2 Impurezas orgánicas

Las impurezas orgánicas en los agregados generalmente provienen de la descomposición de material vegetal (ácido tánico), manifestándose en forma de humus o margas orgánicas, acompañado normalmente de olor desagradable.

El problema de su presencia en los agregados es la interferencia durante el proceso de hidratación del cemento, pues alteran el fraguado, reducen las resistencias mecánicas y afectan la durabilidad, dado que se forman compuestos pobres de hidratación.

Las impurezas orgánicas frecuentemente se encuentran en la arena, debido a su mayor carácter retentivo. Para determinar su presencia, la NTC

127 proporciona un procedimiento simple, que consiste en neutralizar los ácidos de la muestra con una solución de hidróxido de sodio al 3%. La determinación se realiza colocando en un frasco de vidrio cantidades establecidas de arena y la solución. Se agita fuertemente el contenido y se deja en reposo durante 24 horas, comparando luego el color que toma la solución con una carta de 5 colores normalizados (Figura 3.12). A mayor contenido orgánico más oscuro será el color.



Figura 3.21. Método colorimétrico para detectar la presencia de materia orgánica en la arena [†]

Si la coloración no es más oscura que el amarillo estándar (ámbar o color No. 3), la muestra no tiene una cantidad apreciable de impurezas orgánicas y su uso en la mezcla no representa riesgos. Cuando el color es más oscuro que el de referencia, no significa necesariamente que la coloración haya sido causada por compuestos orgánicos, puesto que el color se puede deber a minerales de hierro u otros elementos no dañinos para el concreto; en tal caso, la NTC 579 presenta un método alternativo que consiste en elaborar cubos de mortero con la arena que se ensayará, y comparar su resistencia a la compresión con la de otro mortero con las mismas características, pero hecho con arena de calidad conocida; si el mortero elaborado con la arena en duda presenta una resistencia a los 28 días superior al 95 %, respecto a la del mortero elaborado con la arena testigo, la arena no contiene impurezas orgánicas dañinas, pudiéndose usar en la elaboración de concreto.

3.5.3 Contaminación salina

En general, la contaminación salina se presenta en arenas de playa, zonas de estuarios

o de desiertos. Tal como se estudió en la sección 3.2.1, estas arenas contienen materiales considerados perjudiciales, como sales y conchas que afectan las propiedades del concreto.

Cuando es imprescindible el uso de arena marina en la producción de concreto, es recomendable lavarla muy bien con agua dulce (léase potable), para sacar la sal. Aunque el problema ocasionado por las sales en con-

cretos sin refuerzo es muy poco, no se recomienda para concretos reforzados ni para concretos arquitectónicos. El uso para concreto pre-esforzado y postensado está prácticamente prohibido.

3.5.4 Partículas inestables

Partículas como pizarras, carbón, terro-

Tabla 3.10. Límites para sustancias dañinas en el agregado fino para concreto (3.3)

Material	Tipo de concreto	Máximo % del peso total de la muestra
Terrones de arcilla y partículas deleznable.	Todos	3,0
Material que pasa el tamiz 75 μm .	Concreto sujeto a abrasión	3,0 ^A
	Todos los demás concretos	5,0 ^A
Carbón o lignito.	Cuando la apariencia superficial es importante	0,5
	Todos los demás concretos	1

A: En el caso de arena triturada, si el material que pasa el tamiz de 74 μm , contiene polvo de trituración libre de arcilla o esquistos, estos límites pueden incrementarse al 5% y 7%, respectivamente.

Tabla 3.11. Algunas partículas inestables y su efecto en el concreto

Partículas	Efecto en el concreto
Pirritas de hierro y marcasitas	Expansiones. En presencia de agua forma ácido sulfúrico y ataca la pasta de cemento. En climas cálidos y húmedos puede causar manchas
Carbón	Baja resistencia. Si se expande causa fisuras. En grandes cantidades afecta el tiempo de fraguado. En la parte superficial puede causar picaduras y descascamientos
Mica	En presencia de otros químicos probablemente tome distintas formas. En la arena, la mezcla puede requerir mayor demanda de agua afectando la resistencia
Madera	Se descompone formando materia orgánica. Da baja resistencia y durabilidad
Yeso y anhidrita	Produce ataque por sulfatos
Esquistos	Al absorber agua se hincha causando fisuras en la pasta endurecida
Deleznales	Pueden desintegrarse con los dedos reduciéndolos a material fino, requiriendo mayor cuantía de agua de mezcla y causando disminución de la resistencia
Óxido de hierro y sulfuro de hierro	Manchas no deseadas

nes de arcilla, trozos de madera y otros materiales blandos, son consideradas como inestables o débiles, pudiendo estar presentes en los agregados, afectando las propiedades del concreto.

En general, estas partículas no mantienen su integridad o causan expansiones, ocasionando baja resistencia y durabilidad al concreto. Revisten especial importancia en las estructuras expuestas a la abrasión, por tanto, no se recomienda su presencia en los agregados para la elaboración de concretos en pavimentos y pisos. La Tabla 3.11 resume algunos efectos en el concreto de ciertas partículas.

Los materiales blandos generalmente tienen un peso específico bajo y pueden detectarse por flotación al sumergir el material en agua. El procedimiento para determinar el contenido de material blando o de partículas deleznable es descrito en la NTC 589.

En la Tabla 3.10 se relacionan los porcentajes permitidos por la NTC 174, en lo correspondiente a este tipo de partículas para la arena. En el caso del agregado grueso, se debe consultar la NTC 174, pues el límite depende del tipo de estructura donde se vaya a emplear el agregado y la pluviometría que tenga la región.

La Norma INVÍAS 500 establece como máximo valor permisible en terrones de arcilla del 3%, para la arena y la grava; las partículas livianas las limita al 0,5%; en la materia orgánica para la arena, el color más oscuro permisible es el N° 3 (igual a la muestra patrón); y el porcentaje que pasa el tamiz de 74 μm , es del 3%.

3.6 Referencias y bibliografía recomendada

3.1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Concrete and Mineral Aggregates Part. 4, Easton, ASTM, 2006.

3.2. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Norma Colombiana de Construcción Sismo Resistente. Bogotá, AIS, 2010.

3.3. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, NTC 174 - Especificaciones de los Agregados para Concreto - Quinta actualización. Bogotá, ICONTEC, 2000.

3.4. INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO. Registro Gráfico para Control de Calidad de Agregados. Medellín, ICPC, 1984.

3.5. INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO. Selección y Uso de Agregados para Concreto. Notas Técnicas No. 7. Medellín, ICPC, 1979.

3.6. INSTITUTO CHILENO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. Compendio de Tecnología del Hormigón. Santiago de Chile, I.CH.C.H., 1985.

3.7. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. Bogotá, INVÍAS, 2013.

3.8. L'HERMITE, R. A Pie de Obra. Madrid, Editorial Tecnos, 1971.

3.9. MATA LLANA R. Fundamentos de Concreto Aplicados a la Construcción. Bogotá, ICPC, 2007.

3.10. NEVILLE, A.M. Tecnología del Concreto. México, IMCYC. Primera Edición, 1999.

3.11. PÓRTLAND CEMENT ASSOCIATION. Diseño y Control de Mezclas de Concreto, México, IMCYC, 2004.

3.12. ARANGO LONDOÑO, J. F. Durabilidad del concreto, Volumen 1. La reacción álcalis - sílice: diagnóstico y mitigación. Corona, Medellín, 2016.

4 Agua

El **agua en el concreto** cumple funciones importantes en la mezcla y su participación está dada en tres procesos diferentes: en el mezclado, en el curado y en el lavado de los agregados.

Tanto la cantidad como la calidad, son factores importantes a tener en cuenta en el uso y la selección del agua para la mezcla. La cuantía de agua se establece durante el diseño y debe ser celosamente controlada durante la dosificación. La vigilancia de la calidad se hace, bien sea controlando la cantidad máxima presente de ciertos contaminantes, o realizando la comparación de pruebas físicas (fraguado y resistencia del cemento) de dos muestras, una con agua en duda y otra con agua de reconocidas buenas características.

4.1 Agua de mezclado

4.1.1 Influencia en el concreto

El agua de mezclado conforma aproximadamente el 15% en volumen del concreto. Cumple dos funciones básicas: hidrata el cemento para que desarrolle sus propiedades aglutinantes, y proporciona fluidez a la mezcla (manejabilidad) en estado fresco.

El agua de hidratación forma compuestos químicos y queda incorporada en el concreto. El agua que da manejabilidad a la mezcla se evapora, dejando tras de sí canales capilares dentro de la masa de concreto endurecido (Figura 4.1).

Los capilares dejados por la evaporación del agua de manejabilidad influyen decididamente en las características del concreto endurecido. En primer lugar, disminuye la densidad reduciendo la resistencia. En segundo lugar, se convierte en un mecanismo para la entrada de líquidos, vapores y gases, haciendo que el concreto sea permeable, lo cual conlleva a la entrada de elementos

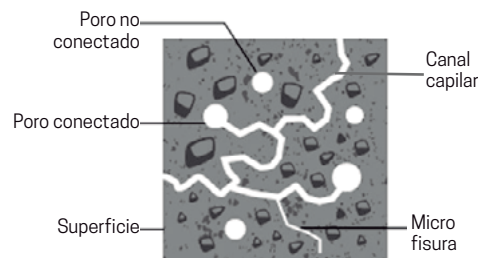


Figura 4.1. Esquema de canales capilares dentro del concreto formados por la evaporación del agua de mezclado*

nocivos, que pueden atacar al concreto física y químicamente. En tercer lugar, los vacíos dejados por el agua evaporada incrementan el riesgo por contracción de fraguado, puesto que la masa de concreto tiene mayor libertad para retraerse, originando así mayor fisuración. Y en cuarto lugar, puede propiciar procesos de corrosión del acero.

Por lo anterior, la cantidad de agua de mezclado influye en las principales propiedades del concreto, siendo este uno de los principales factores a controlar durante la dosificación. En el Capítulo 8, Diseño de Mezclas, se dan las bases para una adecuada dosificación y los ajustes requeridos para por la humedad de los agregados.

4.1.2 Calidad

La calidad del agua suministrada durante la mezcla también es determinante en las propiedades del concreto. Todas las normas del mundo coinciden en que el agua apta para el consumo humano (potable) es la adecuada para la elaboración de mezclas, aunque ciertas aguas de reciclaje (como el agua reciclada en el lavado de los equipos de mezcla) también se pueden usar con algunas precauciones.

El agua con sustancias disueltas o en forma de suspensión, tales como azúcar, ácidos, sales, materia orgánica, aceites, sulfatos, pueden alterar la hidratación del cemento, afectando los tiempos de fraguado, reduciendo la resistencia y la durabilidad. Los efectos varían con el tipo y cuantía de la impureza presente. La Tabla 4.1 enseña algunos contaminantes, la forma como pueden incidir en la mezcla y la cuantía máxima recomendada por la PCA.

Tabla 4.1. Impurezas en el agua de mezclado, su efecto en el concreto y límites máximos recomendados por la PCA

Impureza	Efecto en la mezcla	Valor máximo ^c
Carbonato, bicarbonato de sodio y de potasio	Carbonato de sodio: acelera los tiempos de fraguado. Bicarbonatos: pueden acelerar o retardar los tiempos de fraguado, relacionado con su cuantía y presentación. Ambas sales, en grandes concentraciones pueden reducir la resistencia y fomentar la reacción álcalis - agregado (RAS)	Suma de las sales disueltas: 1.000 ppm ^A
Cloruro (Cl)	Puede corroer el acero de refuerzo. Quizá sean introducidos a la mezcla por algunos aditivos, agregados, materiales cementantes, agua de mezcla	Concreto pretensado: 0,06% Concreto reforzado expuesto a cloruros durante su servicio: 0,15% Concreto reforzado seco y protegido durante su servicio: 1,0% Otras estructuras de concreto reforzado: 0,3%
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	Pueden reaccionar con el C ₃ A del cemento causando expansiones	10.000 ppm
Bicarbonatos de calcio y magnesio	Pueden acelerar los tiempos de fraguado y reducir las resistencias	400 ppm
Sales de hierro	Presentes en aguas subterráneas. Pueden afectar las resistencias	40.000 ppm
Sales inorgánicas de estaño, zinc, cobre, plomo	Pueden causar grandes variaciones en los tiempos de fraguado y significativa reducción de resistencia	500 ppm
Agua de mar	Puede acelerar las resistencias iniciales, pero reducir las finales (luego de 28 días). En concreto reforzado fomenta la corrosión del acero En concreto pretensado se prohíbe su uso. Fomentan o agravan la reacción álcalis - agregado (RAS) Causa eflorescencias (manchas) en la superficie del concreto	Concreto simple: 35.000 ppm
Aguas ácidas	Las aguas con pH < 3, pueden causar bajas resistencias y deben evitarse	Ácido sulfúrico y clorhídrico: 10.000 ppm

Tabla 4.1. (Continuación)

Impureza	Efecto en la mezcla	Valor máximo ^c
Aguas alcalinas	Pueden afectar considerablemente la resistencia, siempre que no sea acelerado el proceso de fraguado. Pueden inducir o agravar la reacción álcalis - agregado (RAS)	Hidróxido de Na: 0,5% ppc ^B Hidróxido de Ca: 1,2 ppc
Aguas de desechos industriales	Generalmente tienen menos de 4.000 ppm, de sólidos totales. Puede causar merma en la resistencia hasta en un 15%. Las aguas procedentes de curtiembres, fábricas de pintura, plantas de coque, plantas de galvanizado y plantas químicas, contienen impurezas peligrosas para el concreto (y para la salud)	No se recomienda su uso en el concreto
Aguas negras	Contienen materia orgánica que afecta los tiempos de fraguado, la resistencia y la durabilidad	400 ppm
Impurezas orgánicas	Causan efectos complejos sobre el tiempo de fraguado y la resistencia última. Proviene del humus y contienen ácido tánico	Se recomienda analizarlas
Azúcares	Causan retardos en los tiempos de fraguado y bajas resistencias iniciales. En grandes concentraciones puede suceder que el concreto no fragüe	500 ppm
Partículas en suspensión	Compuestas por arcillas, limo o polvillo de roca. Pueden reducir la resistencia	2.000 ppm
pH	Anteriormente se anotaron los efectos de las aguas ácidas y las alcalinas	Entre 6 y 8
Aceites	Reducen la resistencia. Pueden estar presentes aceites minerales (petróleo), vegetales o animales. 2,5% ppc, de aceite mineral puede reducir la resistencia en más del 20%	Se recomienda ensayar el agua
Algas	Interfieren la hidratación del cemento e incluyen aire, reduciendo notablemente la resistencia	1.000 ppm

A ppm: partes por millón

B ppc: por peso de cemento

C 1mg/l = 1 ppm

4.2 Agua de curado

4.2.1 Influencia en el concreto

Tal como se explicó en el Capítulo 2, la partícula de cemento requiere de una cantidad adicional de agua luego del fraguado, durante al menos 7 días, para seguirla hidratando y maximizar su potencial cementante. Este es uno de los fundamentos del curado, proceso que es estudiado en detalle en el Capítulo 12.

4.2.2 Calidad

En general, los requisitos para el agua de curado son menos exigentes que para el agua de mezclado; no obstante, se recomienda que sean los mismos del agua de mezclado, puesto que las aguas que contienen materia orgánica o elementos ferrosos, causan manchas sobre la superficie del concreto.

4.3 Agua de lavado de los agregados

El agua usada para el lavado de los agregados no debe contener materiales que formen películas o recubrimientos sobre la superficie de las partículas, toda vez que su concentración puede causar capas destructivas, que ocasionalmente suelen ser más perjudiciales que aquellas causadas por las impurezas en el agua de mezclado. Se recomienda que su calidad sea la misma a la del mezclado.

El problema generado por este tipo de agua luego de su uso, es la disposición final. Las normas ambientales exigen un tratamiento previo para devolverla al sistema de alcantarillado ó a las corrientes de agua.

Las aguas de lavado tanto de los equipos mezcladores como de los agregados, pueden reutilizarse como agua de mezclado, siempre y cuando cumplan los parámetros establecidos en la norma ASTM C1602, alternativa adoptada por la NSR - 10.

4.4 Normas de calidad del agua

Todas las normas que rigen para la producción de

concreto, dictan reglas para el uso del agua en la mezcla. Las siguientes son las especificaciones más importantes de la NSR - 10 y la norma INVIAS.

4.4.1 Norma NSR - 10

La NSR - 10 establece que el agua usada para mezclas de concreto debe cumplir con la NTC 3459 o la ASTM C1602 (cuando los requisitos sean menos exigentes que la NTC 3459).

Norma NTC 3459

Tiene como antecedente la norma Británica BS 3148. El objeto es determinar el método para establecer, mediante ensayos, si el agua es apropiada para la elaboración de concreto.

Relaciona algunas impurezas presentes en el agua de mezcla y los efectos que pueden causar sobre el concreto, estableciendo los límites permitidos en cada uno de ellos (Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Especificación para impurezas en el agua de mezclado según NTC 3459 (4.3)

Impureza		Límite
Orgánicas	Aguas con color oscuro, olor pronunciado, con lama y algas visibles o en formación de color verde o café	Para su aceptación se deben hacer ensayos de fraguado y resistencia
Inorgánicas	Iones de calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonatos, sulfato (SO_4^{2-}), cloruros (Cl^-), nitrato (NO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-})	Contenido total combinado, máximo 2.000 mg/l
	Cloruros	La Tabla C.4.3.1 de la NSR-10, establece los valores límites para el contenido total de cloruros
	Sulfatos	Máximo 3.000 mg/l como SO_4 ; 1.000 mg/l como SO_3 (4% ppc ^A)
	Alcalis: contenido combinado	$Na_2O + 0,658K_2O < 600$ ppm ^B
	Sólidos totales	0,5 kg/l

A ppc: por peso de cemento

B ppm: partes por millón (= 1 mg/l)

Tabla 4.3. Límites químicos opcionales dados por la norma INVÍAS

Contaminante	Límite máximo (ppm)
Ion cloruro	1.000
Ion sulfato (SO_4^{2-})	3.000
Álcali equivalente, como $\text{Na}_2\text{O} + 0,658\text{K}_2\text{O}$	600
Sólidos totales	5.000

La norma establece que cuando el agua sobrepase los límites establecidos, los criterios de aceptación o rechazo se regulan con base en los ensayos de tiempo de fraguado y resistencia a la compresión. Específicamente, consiste en verificar el tiempo de fraguado inicial de una pasta de cemento, y la resistencia a la compresión de cubos de mortero. El tiempo de fraguado se determina con el procedimiento dado en la NTC 118, con la aguja de Vicat, mientras la resistencia se hace con el procedimiento relacionado en la NTC 220.

El tiempo de fraguado inicial se determina a partir de muestras elaboradas con el agua en duda y con agua de reconocidas buenas características para elaborar concreto (testigo). Lo mismo se hace para elaborar los cubos de mortero para determinar la resistencia.

Para aceptar el agua en duda, es necesario cumplir simultáneamente las siguientes condiciones:

- Que los tiempos de fraguado inicial de la mezcla testigo y la elaborada con la del agua en duda, no difieran entre sí en más de 30 minutos.
- Que el promedio de la resistencia a la compresión de los cubos de mortero, hechos con el agua en duda, a 7 días de edad, sea mayor o igual al 90% de la resistencia promedio de los cubos de mortero hechos con el agua testigo. En el evento que la resistencia se encuentre entre el 80% y el 90% de la resistencia de los cubos de mortero testigo, se puede contemplar la modificación de las proporciones de la mezcla. Si es menor, se debe conseguir otra fuente de agua.

Como se dijo, la norma también permite para la fabricación de concreto el uso de agua procedente del lavado

de los equipos de mezclado o de las zonas donde se almacenan materias primas, siempre que los ensayos cumplan con las especificaciones dadas.

Norma ASTM C1602

Esta norma permite el uso de agua potable sin necesidad de realizarle pruebas. Incluye métodos para calificar las fuentes de agua no potable considerando los efectos en el tiempo de fraguado del concreto y la resistencia. También establece frecuencias de ensayo para asegurar el monitoreo continuo en la calidad del agua. Así mismo, la norma proporciona límites opcionales para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla, a los que se puede apelar cuando se requiera.

4.4.2 Norma INVÍAS

Establece que el agua potable es adecuada para mezclas de concreto, sin exigir pruebas adicionales para su aceptación. Además hace los siguientes requerimientos:

- El pH debe estar entre 5,5 y 8,5.
- La resistencia a la compresión en cubos de mortero, a 7 días, debe ser como mínimo el 90% respecto del patrón.
- La desviación en el tiempo de fraguado del mortero procedente del tamizado del concreto a través de la malla 4,75 mm (N° 4), respecto del tiempo de control, debe ser de 1:00 (horas: minutos) inicial a 1:30 final.

Opcionalmente, establece los límites químicos dados en la Tabla 4.3, para que el productor de concreto mantenga documentada la química y la cantidad del agua de mezcla, a menos que la especificación exija alguno de ellos en particular.

4.5 Referencias y bibliografía recomendada

4.1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1602M-12, Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012

4.2. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. Bogotá, AIS, 2010.

4.3. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. NTC 3459. Bogotá, ICONTEC, 2001.

4.4. MATA LLANA R. Fundamentos de Concreto Aplicados a la Construcción. Bogotá, ICPC, 2007.

4.5. NEVILLE, A.M. Tecnología del Concreto. México, IMCYC. Primera Edición, 1999.

4.6. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Diseño y Control de Mezclas de Concreto, México, IMCYC, 2004.

4.7. STEINOUR, M. Concrete Mix Water - How Impure Can it be? Reimpresión del Journal de la PCA Research a Development Laboratories, No. 2, No. 3, 1960.

5 Aire

El aire es un constituyente del concreto, puede ser naturalmente atrapado o incluido de forma intencional. Influye de manera determinante en sus propiedades.

Hasta hace algunos años, se consideraba que el concreto estaba constituido solamente por agregados, agua y cemento. No obstante, cuando la mezcla es colocada en la formaleta y no es sometida a un proceso de compactación, o este presenta deficiencias, queda una serie de huecos que atrapan aire naturalmente. En el concreto endurecido, comúnmente son conocidos como “hormigueros” por su distribución, tamaño y semejanza con estos.

A mediados de los años 30, por casualidad, fueron descubiertos los beneficios que aportan las burbujas de aire que son introducidas en la mezcla por ciertos agentes, especialmente para la resistencia a los ciclos de hielo – deshielo. Esto ocasionó su estudio, desarrollo y empleo en el concreto, a tal punto que hoy representa uno de sus grandes avances. A estas burbujas actualmente se conocen como aire incluido o incorporado.

Tanto el aire atrapado, como el incluido, influyen de manera determinante en las propiedades del concreto. Por ello la tecnología del concreto hoy lo admite y lo trata como un elemento constitutivo.

5.1 Aire atrapado

El aire naturalmente atrapado en el concreto solo aporta propiedades indeseables. En primer lugar, su cantidad es variable, se distribuye de manera heterogénea y aleatoria, con formas y tamaños diversos formando los “hormigueros”, que además le dan un aspecto poco estético a la estructura (Figura 5.1).

En segundo lugar, baja la densidad y por tanto disminuye la resistencia a los esfuerzos mecánicos. En tercer



Figura 5.1. Aspecto de concretos con excesivo aire atrapado por mal vibrado‡

lugar, incrementan la permeabilidad permitiendo la entrada de líquidos, vapores y gases que atentan contra la durabilidad. En cuarto lugar, el acero de refuerzo no queda totalmente embebido en el mortero, bajando la eficiencia del trabajo conjunto entre los dos materiales; además, el acero queda expuesto a la corrosión por la falta de recubrimiento.

Por lo anterior, la compactación de la

mezcla es un proceso muy importante, pues permite expulsar el aire atrapado, reacomodar el concreto y permitir que el acero quede embebido y protegido por el mortero.

Como se puede ver en la Figura 5.1, la cantidad de aire atrapado es variable y depende fundamentalmente del grado de compactación. A manera experimental, el ACI ha podido determinar que el porcentaje promedio aproximado de aire atrapado en la mezcla es inversamente proporcional al Tamaño Máximo Nominal (TMN) del agregado, es decir, en la medida que este aumenta, el aire atrapado disminuye, como se muestra en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1. Cantidad aproximada de aire atrapado según el TMN (5.11)

TMN		% promedio aproximado de aire atrapado
Pulgadas	mm	
3/8	9,5	2,7
1/2	12,5	2,5
3/4	19	2,0
1	25	1,7
1 1/2	37,5	1,5
2	50	1,0
3	75	0,3
6	150	0,2

5.2 Aire incluido o incorporado

*El **aire incluido o incorporado**, consiste en introducirle de manera intencional al concreto, durante el proceso de mezclado, pequeñas burbujas en forma de esferas de aproximadamente 1 mm de diámetro en promedio. El tamaño varía entre 0,05 mm y 1,27 mm.*

La formación de las burbujas se hace a través de aditivos inclusores de aire o cementos fabricados con la opción A (descritos en el Capítulo 2). Los compuestos de los aditivos o agentes inclusores de aire generalmente son sales y resinas de madera, detergentes sintéticos, lignina sulfonada, ácidos del petróleo, o grasas y aceites de origen animal y vegetal y sus ácidos grasos, o algunas sales orgánicas de hidrocarburos sulfonados.



Figura 5.2. Aspecto del concreto con aire incorporado en alto volumen †

La producción de las burbujas, se realiza por la disminución de la tensión superficial del agua, mediante un agente que promueve su formación, proporcionando estabilidad durante la elaboración, fraguado y endurecimiento. El aire se distribuye uniformemente en toda la masa de concreto, influyendo en las propiedades como la manejabilidad, la resistencia, la cohesividad y la durabilidad (Figura 5.2).

5.2.1 Manejabilidad

Las burbujas de aire incluido tienen resistencia propia y actúan como esferas dentro de la masa de concreto fresco, haciendo que las partículas se desplacen mejor, unas sobre otras. Como consecuencia se tienen mezclas con mejor trabajabilidad en estado fresco, toda vez que le proporcionan una mayor fluidez.

El efecto de la inclusión de aire en la trabajabilidad se hace más efectivo en mezclas pobres (mezclas con bajo contenido de cemento) o aquellas con agregados de forma angular o con una gradación pobre en la arena, pues la falta de partículas de uno o varios tamaños, puede ser reemplazada por las burbujas de aire incluido, especialmente en la fracción fina.

El aire incluido también ayuda a ciertos métodos de colocación del concreto, como el bombeado, dada la reducción de la fricción entre la mezcla y las paredes de la tubería.

5.2.2 Resistencia

El aire incluido puede reemplazar parte de la arena de la mezcla, en una cantidad aproximadamente igual al volumen de aire incluido.

Con ello se puede lograr la misma manejabilidad, pero dado que la arena es reemplazada por vacíos, se obtienen concretos con menor resistencia.

Se estima que por cada 1% de aire incluido, se puede reducir cerca del 3% del agua de mezclado, para lograr una determinada manejabilidad. Además, por cada 1% de aire incluido, la pérdida de resistencia puede estar entre 3% y 5%. Superponiendo estos dos efectos, se considera que la pérdida total de resistencia puede llegar a ser hasta del 15%.

5.2.3 Mitigación de la segregación y la exudación

Los fenómenos de segregación y exudación se estudian en el Capítulo 7, Propiedades del Concreto. En general, la segregación de una mezcla ocurre cuando las partículas gruesas se separan de las más finas, o cuando se tienen mezclas muy húmedas y la pasta se separa de los agregados. De la misma manera, la exudación ocurre cuando parte del agua de mezclado migra hacia la superficie del concreto recién colocado. Cualquiera de los dos casos se da por falta de cohesión, bien sea por mezclas muy secas o porque son muy húmedas, o porque los constituyentes sólidos no pueden retener toda el agua cuando se asientan, normalmente cuando faltan algunos tamaños de agregado en su fracción más fina.

El aire incluido aumenta la cohesividad de la mezcla, haciendo que el riesgo de segregación disminuya. Por otra parte, la presencia de burbujas de aire conserva en suspensión las partículas sólidas, haciendo que la sedimentación se reduzca y no se expulse agua.

5.2.4 Durabilidad

Resistencia al congelamiento - deshielo

Como se ha explicado, la masa de concreto endurecida es permeable por naturaleza, entre otras razones, por la formación de canales capilares durante la evaporación del agua de mezclado (Figura 5.3). Cuando penetra agua al concreto y se congela por acción de bajas temperaturas, esta aumenta de volumen (aproximadamente del 9%) originando esfuerzos de tensión internos, causando roturas proporcionales a la profundidad de penetración. Con el efecto acumulativo de los sucesivos ciclos de hielo - deshielo, la estructura se va degradando progresivamente. Se estima que en una congelación de -5°C , el hielo puede generar una presión cercana a los 50 MPa (500 kg/cm^2 ó 7.200 psi), suficiente para romper el concreto.

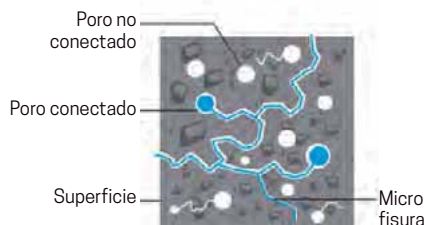


Figura 5.3. Esquema de una masa de concreto endurecido, con sus canales capilares y aire incorporado*

Como se explica en la Figura 5.3 y 5.4, con la incorporación de aire las burbujas interceptan buena parte de los canales, disminuyendo la capilaridad; en consecuencia, el agua penetra pero solo hasta cierta profundidad, haciendo que el concreto sea menos permeable. Cuando se produce el congelamiento, el agua aumenta de volumen, desplazándose hacia la burbuja de aire, evitando que se originen las tensiones que rompen el concreto.

Mitigación de los sulfatos

El efecto de la durabilidad por la incorporación de aire en el concreto puede ayudar como protección de estructuras expuestas a la acción de sulfatos, pues el efecto que se genera es similar al ya descrito en los ciclos de hielo deshielo. El aire incorporado protege al concreto de dos formas: una impidiendo que entre el agua y deposite la sal; y otra, actuando como "aliviador de presión" en el evento que se desarrolle la acción química.

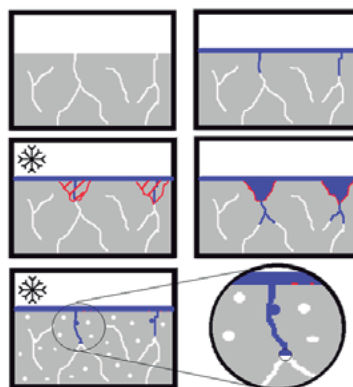


Figura 5.4. Esquema de la actuación del aire incorporado, para proteger el concreto de los ciclos de hielo - deshielo (5.9)

En la Figura 5.4 superior izquierda, se muestran los canales capilares sin agua. En la figura superior derecha, cuando ingresa el agua a los canales. La figura del medio izquierda, muestra el efecto destructor del agua congelada, al romper la zona de influencia de los canales capilares. En la figura del medio derecha, se muestra el efecto acumulativo y progresivo de destrucción, por los continuos ciclos de hielo – deshielo. En la figura inferior se detalla cómo actúa el aire incorporado, impermeabilizando el concreto por el corte de la capilaridad y el efecto de “alivio de presión”, cuando el agua se congela.

Reducción del efecto de la reactividad Alcali – Sílice (RAS)

Como se ha visto, la RAS se da por la formación de productos expansivos debidos a la reacción de los hidróxidos de álcali con la sílice activa de los agregados y en presencia de agua. Si el aire incorporado le baja la permeabilidad al concreto, se reduce en la misma medida la velocidad de la reacción expansiva, mitigando la labor destructiva.

5.3 Factores que afectan el contenido del aire

Algunos estudios han encontrado varios factores que inciden en el contenido de aire en la mezcla, siendo el tamaño máximo, el contenido y tipo de cemento, la arena, el asentamiento, la compactación, la temperatura del concreto, el proceso de mezclado, el terminado prematuro, los agentes colorantes y los aditivos inclusores de aire, como se resume a continuación (5.10).

5.3.1 Tamaño máximo (TM) y cemento

El TM del agregado grueso y el contenido de cemento de una mezcla, tienen un efecto importante en el contenido de aire (incluido y atrapado). Cuando el TM es mayor a 38 mm, el cambio en el contenido de aire es poco; para TM más pequeños, el contenido de aire se incrementa bruscamente debido a que el volumen de mortero se aumenta. A medida que el contenido de cemento aumenta, el contenido de aire decrece para el rango normal del contenido de cemento.

Desde otra mirada, para una misma cantidad de aditivo incorporador de aire, un cemento con alto contenido de álcali incorporará mayor cantidad de aire, que un cemento de contenido menor. Por esta razón, para asegurar la cantidad correcta de aditivo incorporador de aire, es importante controlar las ca-

racterísticas del cemento en la planta dosificadora, cuando tiene origen en diferentes fuentes.

5.3.2 Arena

Para una cantidad dada de cemento o aditivo, en la medida que se incrementa la cuantía de arena, se consigue atrapar mayor cantidad de aire durante el mezclado.

Las partículas de arena que más incorporan aire en la mezcla, son aquellas que pasan el tamiz 600 μm (No. 30) y las que quedan retenidas en el tamiz 150 μm (No. 100). De la misma forma, las partículas de agregado que pasan el tamiz 150 μm (No. 100), producen una significativa reducción en la cantidad de aire atrapado. Sin embargo, arenas con idéntica granulometría pero de distinta fuente, pueden atrapar diferentes cantidades de aire, debido principalmente a las diferencias de forma y textura superficial de las partículas o a la contaminación con pequeñas proporciones de materia orgánica.

5.3.3 Asentamiento y vibración

Antes de efectuar el proceso de vibración, el contenido de aire se incrementa a medida que crece la manejabilidad, hasta asentamiento de aproximadamente 150 mm, y luego decrece para asentamientos mayores a este valor. Después de 15 segundos de vibración, se logra una considerable reducción en el contenido de aire para todos los asentamientos, tal como se aprecia en la Figura 5.5.

Entre mayor sea el asentamiento mayor será el porcentaje de reducción de aire durante el vibrado; pero si la vibración no se aplica adecuadamente, se puede dar una pérdida de aire incluido.

De otra parte, con un vibrado moderado se expelen grandes burbujas de aire atrapado, pero si hay un exceso en el tiempo, saca también parte del aire incorporado y se produce segregación. En el Capítulo 9, Producción de Concreto, se trata el tema de la vibración con más detalle.

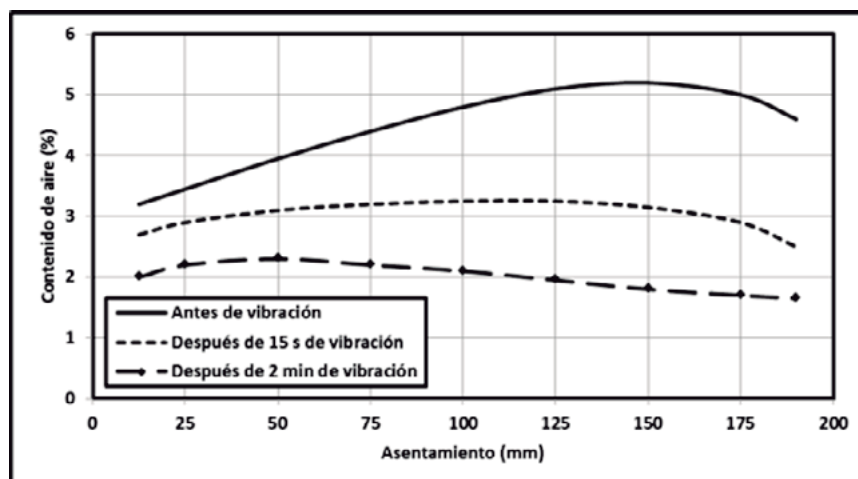


Figura 5.5. Relación entre el asentamiento, tiempo de vibración y contenido de aire en el concreto. Adaptada de (5.10)

5.3.4 Temperatura del concreto

La temperatura del concreto tiene una relación directa con el contenido de aire. A medida que aumenta la temperatura del concreto, el contenido de aire disminuye. Este efecto es más pronunciado con el incremento del asentamiento, volviéndose especialmente importante en climas cálidos, donde la temperatura del concreto puede ser mayor.

5.3.5 Mezclado

El mezclado es el factor más importante en la incorporación de aire, pues es durante este proceso donde se generan y distribuyen las burbujas en la mezcla. Un mezclado incompleto hará que no se genere la cantidad de burbujas requerida, ni que su distribución sea uniforme a través de la mezcla.

La cantidad de aire incluido varía con el tipo y estado de la mezcladora, la cantidad de concreto mezclado, y la tasa y duración del mezclado. La cantidad de aire incluido disminuye en la medida que las espas se encuentren más gastadas, y si se acumula concreto endurecido en el tambor o en las espas.

La incorporación de aire es escasa en mezclas pequeñas hechas en grandes mezcladoras; por el contrario, el contenido de aire incorporado aumenta, a medida que la cantidad de mezcla se aproxima a la capacidad de la mezcladora.

El contenido de aire incorporado aumenta en la mezcla a medida que se incrementa la velocidad de la mezcladora hasta 20 rpm; a velocidades mayores, ocurre una

disminución, si el mezclado es muy prolongado.

5.3.6 Terminado prematuro

Aunque las técnicas para el terminado del concreto no generan pérdida de aire incluido, el terminado prematuro causa, además de exudación, pérdida de aire incluido y concretos propensos a descascamientos.

5.3.7 Aditivos y agentes colorantes

Los efectos que causan los aditivos y agentes colorantes en la incorporación de aire son muy variados. El uso de materiales a base de carbón disminuye la cantidad de aire incluido, para una cierta cantidad de aditivo. Los aditivos reductores de agua y retardantes de fraguado normalmente aumentan la eficiencia del incorporador de aire. Los retardantes de fraguado aumentan el espaciamiento entre las burbujas. Es factible, que algunos aditivos retardantes y reductores de agua, pueden no ser compatibles con el inclusor de aire. Los superplastificantes, pueden aumentar o disminuir el contenido de aire en la mezcla, dependiendo de la formulación del aditivo y el asentamiento de la mezcla.

5.3.8 Materiales cementantes suplementarios

El efecto de las cenizas volantes y el metacaolín generalmente reduce la cantidad de aire atrapado. Por el contrario, el empleo de grandes cantidades de escoria y humo de sílice, pueden requerir, hasta el doble de dosis de aditivo inclusor de aire.

5.3.9 Aditivo incorporador de aire

La naturaleza y composición del aditivo influye sobre la cantidad de aire incorporado, el tamaño de las burbujas, su espaciamiento, su estabilidad en la masa y su resistencia elástica para conservarse y permanecer en el concreto. También puede ser más o menos sensible a reaccionar con alguno de los compuestos del cemento, el agua, los agregados y aun con impurezas orgánicas o con otros aditivos.

Así mismo, la dosis de aditivo influye en forma directa y proporcional en la cantidad de aire incorporado. Para una mezcla dada, el aumento en la dosis de aditivo agrega mayor cantidad de aire. Cada aditivo posee un límite máximo de uso, después cualquier aumento en la dosis no refleja una mayor cantidad de aire incorporado y, por el contrario, causa bajas resistencias. Así mismo, en la medida que se adicione más aire en la mezcla, llegará el momento en que en vez de ganar durabilidad, de manera adversa, la puede afectar, tal como se aprecia en la Figura 5.6.

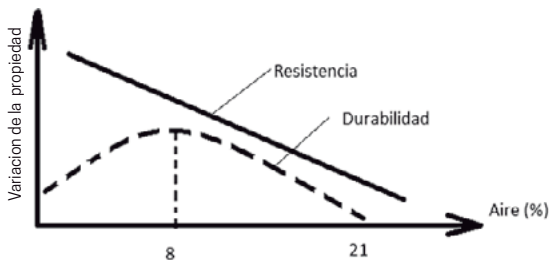


Figura 5.6. Esquema del comportamiento del contenido de aire en la resistencia y la durabilidad en hielo y deshielo. Adaptada de referencia (5.9)

5.4 Medida del contenido de aire

Existen varios métodos para medir la cantidad aproximada de aire en la mezcla; éstos, tan solo indican el volumen de aire, más no las características de los vacíos, tales como el tamaño de las burbujas, su distribución en la masa de concreto, la forma, su ubicación y la distancia entre ellas.

La medida del contenido de aire se hace sobre una muestra representativa, una vez descargada. Existen dos procedimientos de ensayo: el de presión y el volumétrico, siendo el primero el más usado.

El método de presión se describe en la NTC 1032; se emplea cuando los agregados son relativamente densos. Se basa en la ley de Boyle, que se refiere a la disminución del volumen de un gas, cuando se incrementa la presión a la que está sometido.

El recipiente de medida en el método de presión está conformado por una caja cilíndrica y una cubierta, ensambladas herméticamente (Figura 5.7). El ensayo consiste en colocar la muestra de concreto dentro de la caja, compactarla mediante un procedimiento estándar y taponarla con la cubierta. Para la medición se puede optar por dos alternativas. La primera (equipo Tipo A), consiste en introducir agua hasta una altura establecida con un dispositivo ubicado en la parte superior de la cubierta, y aplicarle una determinada presión con una bomba manual. El descenso del nivel del agua indica una reducción en el volumen del aire de la muestra. Con la presión aplicada y el cambio observado en el volumen, se puede conocer el contenido de aire.

La segunda alternativa (Tipo B), consiste en igualar un volumen determinado de aire, a presión conocida, con el volumen desconocido de aire en la muestra de concreto.



Figura 5.7. Recipiente de medida del contenido de aire. Método de Presión †

El método volumétrico sigue el procedimiento de la NTC 1028 y se utiliza para concretos con cualquier tipo de agregado. Determina el contenido de aire como la diferencia entre el volumen de una muestra de concreto bajo agua y el volumen de la misma muestra después arrastrar el aire por agitación. Este método se realiza con un aparato similar al mostrado en la Figura 5.8, que consiste en una caja cilíndrica y una cubierta provista de un cuello de plástico o de vidrio transparente, capaz de formar un ensamblaje hermético y rígido con la caja.

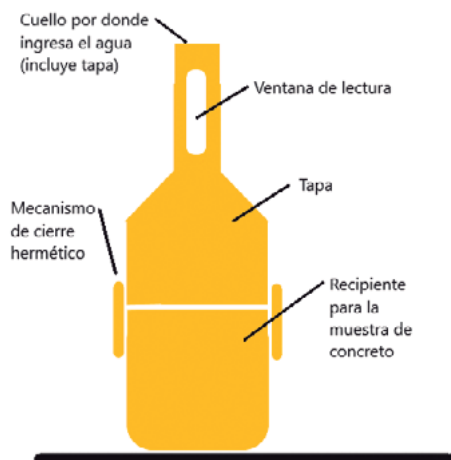


Figura 5.8. Recipiente de medida del contenido de aire. Método volumétrico †

Se llena la caja con concreto fresco, igual al método anterior. Después de colocar la cubierta, se procede a insertar un embudo y añadir agua hasta que aparezca en el cuello graduado en la marca cero. Se elimina todo el aire agitando el recipiente y se agrega con una jeringa alcohol isopropílico hasta dispersar la espuma en la superficie del agua. El contenido de aire es la suma de la lectura del cuello graduado, más la medida de la cantidad de alcohol añadido.

El ensayo para el contenido de aire, independientemente del método usado, se expresa como un porcentaje del volumen de la mezcla.

5.5 Recomendaciones para el escogimiento del contenido de aire

En general, la cantidad de aire incorporado en el concreto depende del tipo de estructura, las condiciones climáticas, si la estructura estará expuesta a ciclos de congelamiento y deshielo, la acción de agentes descongelantes, la resistencia especificada del concreto, así como de las exposiciones severas, tales como agua o suelos agresivos.

La NSR - 10, establece que el concreto de peso normal y liviano expuesto a clases F1, F2 y F3 (ver categorías y clases de exposición dadas por la NSR - 10 en el Capítulo 7 Propiedades del Concreto), debe tener aire incorporado con el contenido total de aire (atrapado + incorporado) dado en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Contenido total de aire para concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo

Contenido de aire en, %			
TMN		Exposición clases F2 y F3	Exposición clase F1
Pulgadas	mm		
%	9,5	7,5	6,0
½	12,5	7,0	5,5
¾	19,0	6,0	5,0
1	25,0	6,0	4,5
1 ½	37,5	5,5	4,5
2	50,0	5,0	4,0
3	75	4,5	3,5
6	150	-	-

La tolerancia en el contenido de aire incorporado debe ser $\pm 1,5\%$. Para $f'c > 35$ MPa, se puede reducir el aire incorporado indicado en la Tabla 5.2 en 1%.

5.6 Referencias y bibliografía recomendada

5.1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS- ASTM. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete - Making Materials, ASTM Special Technical Publication 169B.

5.2. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM. Norma ASTM C231M Método de ensayo para la medición del contenido de aire del concreto recién mezclado, mediante el método de presión. ASTM, 2014.

5.3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS ASTM. Norma ASTM C173M Método de ensayo para la medición del contenido de aire del concreto recién mezclado, mediante el método de volumétrico. ASTM, 2016.

5.4. ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR - 10. Bogotá, AIS, 2012.

5.5. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas Técnicas Colombianas para la Construcción. NTC 1028 Método volumétrico para medir el contenido de aire en el concreto. Bogotá, ICONTEC, 2008.

5.6. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas Técnicas Colombianas para la Construcción. NTC 1032 Método de presión para medir el contenido de aire en el concreto. Bogotá, ICONTEC, 2008.

5.7. INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO, SOLINGRAL. Capítulo de Dosificación de Mezclas de Concreto, Medellín, ICPC, 1979.

5.8. NEVILLE, A.M. Tecnología del Concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. México, IMCYC, 1999.

5.9. MATA LLANA R. Fundamentos de Concreto Aplicados a la Construcción. Instituto Colombiano de Productores de Cemento – ICPC. Bogotá, 2007.

5.10. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Skokie, Illinois, PCA, USA. 2004.

5.11. SANDINO, A. Materiales para Estructuras. Bogotá, Escuela Colombiana de Ingeniería, 1981.

6 Aditivos para el concreto

Aditivo: según los define el ACI 116R, son materiales diferentes al agua, cemento, agregados y fibras de refuerzo, y que se incorporan como ingrediente del concreto o del mortero, inmediatamente antes o durante el mezclado”.

Los aditivos son productos que brindan diversidad de usos a la mezcla, como mejorar determinadas características, lograr mayor economía, ahorrar energía, contrarrestar eventuales deficiencias o desarrollar propiedades especiales.

El uso de aditivos en la tecnología moderna del concreto data del Siglo XIX, cuando se da la primera generación de aditivos, con productos de pobre tecnología, que además de segregar, generaban pérdidas de asentamiento. Entre 1875 y 1890, en Francia, el uso de yeso crudo y cloruro de calcio, se hizo para controlar los tiempos de fraguado. En 1895, comenzó la adición de cal grasa para el mejoramiento de la plasticidad. El Siglo XX marcó el desarrollo de los aditivos denominados como segunda generación, donde se presentaron avances tecnológicos importantes: se ganó en cohesividad y trabajabilidad, pero con un aumento de la exudación. Hacia 1905 se conoció del efecto retardante del azúcar y su influencia en los tiempos de fraguado. En 1926, Feret investigó el efecto de algunos finos dentro de las propiedades de la mezcla, tales como el alumbre, el jabón, las calizas, los carbonatos, silicatos, y colorantes. En 1929, Regade descubre e introduce el poder retardante del zinc en el fraguado. Los plastificantes comienzan a comercializarse en 1934. Hacia 1930, como se mencionó en el capítulo anterior, se descubren las propiedades de los inclusores de aire. Y En 1959 empieza la comercialización de los retardantes de fraguado.

Ya, a finales del siglo XX e inicios del XXI, inicia la era de los aditivos conocidos como tercera generación, desarrollándose los hiperplastificantes, los de control de la reacción álcalis-sílice, los compensadores de contrac-

ción y los modificadores de viscosidad, entre otros. El progreso de los aditivos ha sido notable durante los últimos tiempos, contribuyendo al desarrollo en diferentes tipos de concretos y sistemas constructivos. El llamado sistema industrializado en la construcción con formaletas, el bombeo de la mezcla, el desarrollo de prácticas especiales, como el deslizado y la elaboración de concretos con alto desempeño, son algunos ejemplos de su constante evolución.

Dado que los aditivos normalmente son productos que interactúan con el cemento, la dosificación se suele suministrar en términos del porcentaje del peso del cemento presente en la mezcla (por peso de cemento o ppc). Así mismo, se pueden emplear en forma sólida o líquida, prefiriéndose esta última porque se dispersa más fácil, rápido y de manera homogénea durante el mezclado.

El efecto de un aditivo en la mezcla depende de muchos factores como las características y cantidad de cemento, las propiedades de los agregados (granulometría, cuantía de finos, contenido de materia orgánica, arcilla, etc.); temperatura ambiente y en la mezcla, dosis usada, cantidad y tipo de agua, y el empleo de otros materiales, entre otros. Para hallar la cuantía óptima de un deter-

minado aditivo, los fabricantes recomiendan realizarlo en mezclas de prueba en laboratorio, con los materiales a usar en la obra, tratando de simular las temperaturas, humedades y demás características a las que estará sujeta la obra. De esta manera, se puede verificar su compatibilidad con otros aditivos y materiales de trabajo, así como los efectos en las propiedades del concreto.

Es de anotar, que los defectos de una mezcla producida con componentes de mala calidad, deficiente dosificación o segregación causada durante el transporte, no se arreglan con el uso de un aditivo.

Algunos aditivos pueden lograr más de un efecto en el concreto, como es el caso del cloruro de calcio que, bajo algunas condiciones, mejora la trabajabilidad, acelera el fraguado y el endurecimiento y, por sus propiedades higroscópicas, ayuda al curado. Además, los aditivos pueden contener materiales que, separadamente, pertenecen a dos o más grupos, de tal manera que se pueden combinar para lograr sinergias. Por ejemplo, un aditivo reductor de agua se puede usar junto con un incorporador de aire. Pero otros, en cambio, pueden ser incompatibles puesto que, al actuar en conjunto, pierden en parte o totalmente sus características.

6.1 Tipos de aditivos

Se han desarrollado diversos tipos de aditivos, clasificándolos por la función que cumplen dentro del concreto, y que en ocasiones pueden tener una acción adicional. A continuación se estudian los aditivos más comúnmente usados en el medio, como son los especificados por la NTC 1299 (ASTM C494): aditivos reductores de agua de control de fraguado y los inclusores de aire.

La NTC 1299 clasifica los aditivos reductores de agua y control de fraguado, así:

Tipo A: aditivos reductores de agua.

Tipo B: aditivos retardantes o retardadores de fraguado.

Tipo C: aditivos acelerantes.

Tipo D: aditivos reductores de agua y retardantes.

Tipo E: aditivos reductores de agua y acelerantes.

Tipo F: aditivos reductores de agua de alto rango.

Tipo G: aditivos reductores de agua de alto rango y retardantes.

Los aditivos reductores de agua también se conocen como “plastificantes”, y a los reductores de agua de alto rango, junto con los reductores de agua

de alto rango y retardantes (Tipo F y G), se les denominan como “superplastificantes”.

6.1.1 Aditivos reductores de agua y de control de fraguado

Reductores de agua o plastificantes

Como su nombre lo indica, su función es reducir el contenido de agua de mezclado, generalmente entre el 5% y el 10%, manteniendo la consistencia o grado de trabajabilidad. De manera alterna, se pueden obtener mezclas más trabajables manteniendo la cantidad de agua, caso en el que actúa como plastificante.

El mecanismo de acción de estos aditivos consiste en ionizar (cargar negativamente) los granos de cemento, proporcionándole a las partículas un efecto de repulsión, haciendo que la mezcla sea más dócil en estado fresco. Este efecto es temporal y depende, principalmente, de la dosis y del tipo de cemento usado.

Algunos aditivos reductores de agua pueden, además, retardar el tiempo de fraguado del concreto. Con pequeñas variaciones en su composición, se pueden obtener notorios efectos retardantes, pero en otros casos, pueden no tener un efecto significativo. Así mismo, algunos reductores pueden incorporar aire a la mezcla, lográndose de esta forma un efecto combinado.

Una de las consecuencias del uso de aditivos reductores de agua es el incremento en la resistencia, siempre y cuando se conserve constante la cantidad de cemento y el asentamiento sea el mismo. La efectividad varía de manera considerable, dependiendo principalmente de la composición del cemento. Se ha encontrado que las mejores resistencias se logran con cementos de bajo contenido de álcalis o de bajo contenido de aluminato tricálcico (C_3A). Así mismo, el contenido de puzolana también influye, hallándose los mejores resultados en mezclas que contienen adiciones puzolánicas que en mezclas solo con cemento Pórtland.

Otro factor importante, derivado de la reducción de agua en la mezcla, es la disminución en la permeabilidad y la consecuente ganan-

cia en la durabilidad. Es claro que al haber menor cantidad de agua evaporable, menores serán los canales capilares que se formen en el concreto.

Algunos de los factores que intervienen en la efectividad de los aditivos reductores de agua son, el contenido de cemento, la cantidad de agua, el tipo de agregado, los inclusores de aire y la temperatura. Dicho así, los efectos finales se logran mejor con la asesoría de los fabricantes, comprobando cada situación particular mediante ensayos previos.

Como se puede apreciar, la aplicación de los aditivos reductores de agua es variada. Se emplean en obras donde se requiera una determinada resistencia con menor cuantía de cemento, teniendo en cuenta que la durabilidad no se vea afectada. También ayudan a la mejora de la trabajabilidad en concretos con agregados de gradación pobre. Resultan indispensables para el bombeo del concreto o la colocación y compactación bajo condiciones difíciles.

Reductores de agua de alto rango o superplastificantes

En esencia, los aditivos reductores de agua de alto rango o superplastificantes, tienen las mismas propiedades que los aditivos reductores de agua normales, pero con mayor eficiencia. Corresponden a los tipos F y G de la norma NTC 1299 (ASTM C494). Estos aditivos pueden reducir significativamente la cantidad de agua de mezclado y el contenido de cemento. Se pueden producir concretos con baja relación agua – cemento, alta resistencia y trabajabilidad normal o alta. En general, pueden reducir entre 12% y 30% la cantidad de agua, pero, actualmente, se han desarrollado aditivos que pueden llegar a reducciones cercanas al 50%, en los denominados aditivos hiperplastificantes, como se muestra en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1. Tipos de reductores de agua

Tipo de reductor de agua	Reducción de agua (%)
Normal	5 a 12
Alto	13 a 30
Hiperplastificantes	31 a 50

La alta reducción en la demanda de agua permite la producción de concreto con resistencia a la compresión mayor a 70 MPa (700 kg/cm² ó 10.000 psi). También se logra muy baja permeabilidad que lo hace menos susceptible a la entrada de agua, vapores, gases, sulfatos, cloruros o cualquier otro elemento que lo deteriore, es decir, se consiguen concretos de alta durabilidad. Así mismo, disminuye considerablemente la exudación, pero se pueden tener superficies que son difíciles de terminar a mano o con equipos mecánicos.

Cuando el aditivo se usa para conseguir un alto incremento en la manejabilidad de la mezcla, sin aumentar la cuantía de agua, se dice que actúa como superplastificante. Los usos de los concretos muy fluidos y alta trabajabilidad se encuentran en estructuras de difícil acceso, como son las secciones delgadas, las áreas con mucho acero de refuerzo, el fundido de estructuras bajo agua, concreto bombeado, las zonas de difícil compactación, y para reducir los costos de mano de obra, manejo, colocación y equipo de compactación (Figura 6.1). No se recomienda su uso para estructuras inclinadas, tales como rampas o paredes de canales que tengan una pendiente mayor a 3 grados, y estructuras que no se encuentren confinadas por la formaleta, puesto que la mezcla se puede escurrir.



Figura 6.1. Estructuras de difícil colocación y compactación del concreto
Arriba, columna en una edificación. Abajo, pilas y veredero en hidroeléctrica ituango (Obra de Constructora Conconcreto, Coninsa y Camargo Correa)

En una mezcla normal, con un asentamiento de 75 mm y la adición de un superplastificante, se puede lograr un concreto fluido de más de 200 mm. La norma para los concretos fluidos (ASTM C1017) lo define como aquel, cuyo asentamiento es mayor a 190 mm y mantiene la cohesividad (Figura 6.2). Para estos concretos ya no se usa el método de asentamiento para medir la trabajabilidad, sino que se han desarrollado otros, como los descritos en el Capítulo 7. Propiedades del concreto.

Los materiales usados como superplastificantes (base lignina y o naftaleno), son mucho más efectivos que los reductores de agua normales. Su efecto en la mezcla puede durar entre 30 y 60 minutos, seguido de una pérdida rápida de trabajabilidad. Para aprovechar al máximo su poder plastificante, la adición a la mezcla suele hacerse en la obra previa al descargue.



Figura 6.2. Concreto de alta fluidez, autocompactante, medido con el método de la extensibilidad †

Los reductores de agua pueden acelerar o retardar el tiempo de fraguado, dependiendo de la composición química, la dosis y la interrelación con otros aditivos y materiales cementantes presentes en la mezcla. Algunos superplastificantes han mostrado retardos entre una y cuatro horas, especialmente cuando se tienen cementos con bajo contenido de C_3A .

Retardantes de fraguado

Un aditivo retardante o retardador de fraguado, es un material que retrasa el tiempo de fraguado, prolongando el tiempo de trabajabilidad en la mezcla.

Los materiales más usados como retardantes son los azúcares (melaza o glucosa) o los lignosulfatos no refinados. En estos últimos, aun no se ha determinado con exactitud el mecanismo de acción.

Se cree que actúan haciendo lento el proceso de hidratación inicial del cemento.

Entre los usos más frecuentes de los retardantes, se encuentran:

- La compensación o mitigación del efecto acelerante de fraguado de las altas temperaturas ($> 25^{\circ}C$) de la mezcla.
- Los retrasos que se pueden tener durante el transporte del concreto, cuando no se produce en la obra.
- La colocación del concreto en estructuras grandes que requieran monolitismo.
- El bombeo de la mezcla a grandes distancias.
- Y la ejecución de técnicas de acabado especiales.

El tiempo de manejabilidad del concreto depende fundamentalmente de la temperatura, el grado de trabajabilidad, tipo y marca de cemento usado y la relación agua/material cementante. Este tiempo se puede prolongar entre 2 y 6 horas con el uso de un retardante normal, aunque se han venido desarrollando productos especiales que pueden ampliar el lapso hasta 11 horas.

El uso de retardantes en dosis no adecuadas puede tener consecuencias adversas, llegando a casos extremos como la no consecución del fraguado ni el desarrollo de la resistencia. También se tienen efectos secundarios como reducción de la resistencia a edades tempranas (7 primeros días), inclusión de aire, reducción de agua en la mezcla e incremento en el riesgo de exudación en la mezcla, entre otras.

Los efectos de los aditivos retardantes en las propiedades del concreto pueden no ser predecibles, siendo necesario la realización de pruebas previas a su uso con los materiales que se van a utilizar y bajo condiciones simuladas de trabajo.

Aditivos acelerantes de fraguado

Los aditivos acelerantes, o también conocidos como aceleradores, son materiales que se añaden a la mezcla para reducir el tiempo de fraguado y acelerar el desarrollo de la resistencia del concreto a edades tempranas (entre 1 y 7 días).

Los efectos de estos aditivos sobre las propiedades del concreto dependen, fundamentalmente, del tipo de agente usado y la dosis. En general, reducen los tiempos de fraguado, algunos incorporan aire, desarrollan calor de hidratación más temprano, aumentan la resistencia a la compresión a edades tempranas, aumentan los cambios de volumen (independiente del método de curado), disminuyen la resistencia al ataque por sulfatos, e incrementan el riesgo de corrosión en el acero de refuerzo embebido en el concreto.

Por lo anterior, los usos de los aditivos acelerantes son variados. Se recomienda cuando se requiere una resistencia inicial alta, que permita un rápido desencofrado, o cuando la estructura necesite ponerse al servicio más pronto. La industria prefabricadora es cliente usual. En climas fríos (entre 2 °C y 5 °C), ayudan a elevar el calor de hidratación, evitando que se prolonguen los tiempos de fraguado, pues el proceso de hidratación del cemento puede verse afectado por las bajas temperaturas. También funciona para iniciar lo más pronto las operaciones de acabado, y cuando se requiera reducir el tiempo de curado y protección. El uso en climas cálidos generalmente desarrolla una evolución rápida del calor de hidratación, se reducen los tiempos de fraguado y se fomenta la aparición de grietas por contracción.

El agente más usado como acelerante es el cloruro de calcio (CaCl_2), por su relación beneficio - costo. No obstante, por tratarse de una sal, puede inducir la corrosión del acero. Por ello, muchas normas restringen o prohíben su uso, especialmente cuando se trata de pretensado. Por tal razón, se han desarrollado otros compuestos como el nitrito de calcio y nitrato de sodio, que son más costosos y resultan menos efectivos.

Otro aspecto en el uso de cloruro de calcio, es la reducción en la resistencia al ataque por sulfatos en mezclas pobres (con bajo contenido de cemento). También se incrementa el riesgo de la reacción álcali- agregado, cuando las partículas son potencialmente reactivas y la mezcla no contiene cemento con bajo contenido de álcalis, ni se usan adiciones para su mitigación.

La dosis del cloruro de calcio en una mezcla no debe exceder del 2% ppc (por peso de cemento). Una sobredosis genera problemas adicionales durante la colocación del concreto, debido al endurecimiento rápido, mayor contracción, mayor riesgo de corrosión del acero de refuerzo y mayor pérdida de re-

sistencia a edades posteriores (luego de 28 días). La dosificación, cuando es en forma líquida, es colocada como parte del agua de mezclado; cuando es en forma de hojuelas, puede no disolverse completamente durante el mezclado, causando descascarillamientos y manchas oscuras en el concreto endurecido.

La NSR - 10, establece en el Capítulo C4 - Requisitos de Durabilidad, las restricciones al uso y las cuantías máximas permitidas de los aditivos a base de cloruro de calcio y de iones cloro (Ver Capítulo 7, Propiedades del Concreto), en especial cuando la estructura puede estar en contacto con otras fuentes de cloruros, como pues ser el caso de plantas de tratamiento de aguas estructuras marinas (Ver figura 6.3).



Figura 6.3. Planta de tratamiento de agua potable sujeta a la acción de cloruros y sulfatos
 Planta de tratamiento regional del norte, Cauca
 Cortesía de Constructora Conconcreto

6.1.2 Aditivos incorporadores de aire

En el Capítulo 5, se estudió el aire incorporado en el concreto de manera intencional, quedando claro que puede ser incluido en la mezcla bien por un cemento inclusor o por un aditivo en forma de pequeñas burbujas estabilizadas.

Las funciones básicas del aire incluido son aumentar la trabajabilidad y la resistencia a los ciclos de congelamiento y deshielo, además de reducir o eliminar la segregación y exudación, mejorar la resistencia al ataque de sustancias químicas, agentes anticongelantes y la acción de los sulfatos, entre otras.

Algunos materiales usados para la ela-

boración de estos aditivos son las sales de resinas de madera (resina vinisol), detergentes sintéticos, sales de lignina sulfonada, sales de ácidos de petróleo, ácidos grasos y resinosos y sus sales y sales de hidrocarburos sulfonatados. Para determinar la acción de un aditivo incluso de aire, se recomienda probarlos en mezclas que involucren los materiales que serán usados y, simulando las condiciones de trabajo en la obra. La Norma ASTM C260, establece las especificaciones y los métodos de prueba para este tipo de aditivo.

6.1.3 Otros aditivos

Durante los últimos años, la industria de los aditivos para concreto se ha venido desarrollando de manera vertiginosa, encontrándose hoy un sin número de especialidades. A continuación se relacionan algunos.

Aditivos de control de la hidratación

Fueron desarrollados a finales de los años 80. Es un sistema compuesto por dos partes: un retardador o estabilizador, que para la hidratación del cemento hasta por 72 horas, y un activador, que cuando se añade a la mezcla, restablece la hidratación de forma normal permitiendo el fraguado y el desarrollo de la resistencia. Se usan para transportar el concreto a grandes distancias o por tiempos prolongados.

Inhibidores de corrosión

Son productos a base de nitrito de calcio, nitrito de sodio, aminos y fosfatos; entre otros, que mitigan, retrasan o inhiben la corrosión del acero embebido en el concreto y expuesto a condiciones agresivas, como: obras marinas, puertos, puentes, parqueaderos; y en general, estructuras expuestas a la acción del ion cloruro. Como se mencionó anteriormente, los nitritos aceleran el tiempo de fraguado por lo que su uso, generalmente, va asociado con un aditivo retardante de fraguado.

La dosis está relacionada directamente con la concentración del ion cloro esperada, siendo necesario que la especificación del proyecto la indique. También se debe determinar la compatibilidad del aditivo con el cemento, otros aditivos y demás materiales, que van a ser empleados en la mezcla, para establecer con certeza los efectos secundarios.

Aditivos reductores de contracción

También fueron introducidos en la década de los 80. Tienen la propiedad de reducir la contracción por fraguado entre 25% y 50%, mitigando la fisuración del concreto causada por la retracción plástica. Sus

principales aplicaciones se encuentran en grandes superficies de concreto expuestas, como pisos industriales, muros, tableros de puentes, losas de pavimentos y losas críticas de edificios; entre otras (Figura 6.4).

Los efectos secundarios causados por el uso de estos aditivos son el retardo en el fraguado y algo de pérdida de manejabilidad. Generalmente, son compatibles con otros aditivos y su dosis puede estar alrededor del 2% ppc.



Figura 6.4. Piso de baja contracción. Bodegas Girardota, con uso de Fortacret 10 de Corona [®]

Aditivos para mitigación de la reacción álcali - agregado (RAS)

Llegaron al mercado hacia la década de los 90. Son productos a base de litio y sales de bario que, aunque han demostrado mediante pruebas de laboratorio reducción de la RAS, no se dispone de mucha experiencia acerca de su efectividad.

Aditivos mejoradores de adherencia

Son generalmente emulsiones de agua de materiales orgánicos como caucho, polivinilo, cloruro, acetatos de polivinilo y acrílicos que, añadidos a las mezclas de concreto o aplicados a la superficie del concreto endurecido, mejoran la adherencia con el concreto nuevo.

Son resistentes al agua, tienen buen comportamiento en aplicaciones exteriores y se pueden usar en lugares expuestos a la humedad. Su efectividad depende del estado de la superficie a aplicar, requiriéndose que se encuentre limpia, seca, libre de polvo, pintura, grasa y, además, a una temperatura adecuada. La dosis normalmente varía entre 5% y 20% ppc, dependiendo de las condiciones de la obra y del tipo de aditivo.

Es muy útil donde se requiera mejorar la adherencia, como reparaciones sobre pañetes o superficies de concreto. Es importante no confundirlos con los agentes adhesivos o puentes de adherencia, que son productos epóxicos para adherir concreto endurecido a concreto fresco en reparaciones de elementos estructurales.

Aditivos reductores de permeabilidad

Se usan en obras donde se quiere evitar la transmisión de humedad a través del concreto que está en contacto con agua o terrenos húmedos. Está demostrado que los mejores métodos para disminuir la permeabilidad son un buen curado y la reducción de la relación agua - cemento.

Algunos materiales finamente molidos como el metacaolín, reducen la permeabilidad como consecuencia de su hidratación y del sello de los poros dejados por el cemento. Con contenidos mínimos del 10% de metacaolín, se han logrado permeabilidades catalogadas como bajas.

Aditivos colorantes

Aun cuando los colorantes muchas veces no se consideran como aditivos, las casas productoras suelen clasificarlos como tales. En el Capítulo 9 se tratan las mezclas coloreadas como un concreto especial.

Por razones estéticas o por demarcación de seguridad, se pueden agregar a la mezcla ciertos pigmentos, que le dan colores específicos. Generalmente su cuantía no excede el 10% ppc, sin que afecten regularmente las propiedades del concreto. Los colores negro y amarillo se usan como guía de seguridad, el rojo para líneas eléctricas enterradas e instalaciones de gas. Pero tal vez las gamas de mayor empleo, son los derivados de los colores tierra como terracotas y amarillos con fines arquitectónicos.

Además de estos aditivos, existe una miscelánea de materiales, como agentes formadores de gas, floculantes, fungicidas, germicidas e insecticidas; entre otros.

6.2 Control de calidad

Los aditivos deben cumplir con ciertos requisitos para su empleo en mezclas de concreto y mortero. Específicamente, la NSR - 10 y la norma INVÍAS establecen lo siguiente.

6.2.1 NSR - 10

El Reglamento, en el Capítulo C.3 - Materiales, dice:

- Los aditivos reductores de agua y para la modificación del tiempo de fraguado deben cumplir con la

NTC 1299 (ASTM C494M).

- Los aditivos empleados para producir concreto fluido deben estar acorde con la NTC 4023 (ASTM C1017M).
- Los aditivos incorporadores de aire deben cumplir con la NTC 3502 (ASTM C260).
- Los aditivos que no estén contemplados en los anteriores, se deben someter a la aprobación del Supervisor Técnico.
- El cloruro de calcio o los aditivos que contengan cloruros, que no provengan de impurezas de los componentes de los aditivos, no se deben emplear en concreto preesforzado, en concreto que contenga aluminio embebido o en concreto construido con formaletas permanentes de acero galvanizado.
- Los aditivos usados en el concreto que contengan cemento expansivo que cumpla con la NTC 4578 (ASTM C845), deben ser compatibles con el cemento y no producir efectos nocivos.

6.2.2 Norma INVÍAS

En resumen, la norma para carreteras de orden nacional establece en el Capítulo 5 que:

- Se pueden usar aditivos de reconocida calidad para las condiciones particulares del pavimento.
- La selección y dosis se debe determinar mediante ensayos efectuados con antelación, sin que se perturben las propiedades restantes de la mezcla, ni representen peligro para el refuerzo que pueda tener el pavimento.
- Se pueden usar inclusores de aire que cumplan con la norma ASTM C260.
- Reductores de agua, acelerantes de fraguado y retardantes de fraguado, que estén dentro de los requerimientos de la norma ASTM C494, incluyendo el ensayo de resistencia a la flexión. Los aditivos reductores de agua se deben incorporar en la mezcla

6.3 Recomendaciones generales para el uso de aditivos

El uso de aditivos requiere seguir una serie de recomendaciones para maximizar su empleo en el concreto, o evitar que se tengan inconvenientes por omitir detalles que pueden pasar inadvertidos.

La primera recomendación es hacer mezclas de prueba antes de emplearlas en el concreto, con los materiales a usar en la mezcla y, en lo posible, simulando las condiciones a que estará expuesta la estructura durante su servicio. Esto se debe, principalmente, a que no todos los cementos tienen la misma química y pueden presentar incompatibilidades con las propiedades del aditivo. También se puede ver cómo es su desempeño con los agregados y otros aditivos. Las pruebas previas son imprescindibles para establecer de manera precisa la dosis.

Una vez encontrada la dosis, es imperativo usar exactamente las cantidades recomendadas. Como se vio, excesos o defectos en la dosis, da como resultado mezclas que no cumplen las expectativas. En el evento de cambiar alguno de los ingredientes, se deben realizar nuevamente mezclas de prueba para realizar los ajustes pertinentes.

La mayoría de los aditivos presentan, en mayor o menor cuantía, efectos secundarios en el concreto. Por ello, es necesario detectarlos en las mezclas de prueba y tenerlos en cuenta para neutralizarlos o crear sinergia.

Los aditivos son sustancias que tienden a reaccionar o a cambiar fácilmente, siendo su almacenamiento un factor clave. La exposición a temperaturas extremas puede alterar su composición. El almacenamiento durante tiempos prolongados los puede deteriorar. Es menester, seguir las recomendaciones del fabricante para cada producto específico y su empleo dentro de la fecha registrada en el empaque y conservar su envoltura original. Los líquidos necesitan ser agitados, pues los componentes más livianos tienden a colocarse en la superficie y los más densos al fondo, perdiendo efectividad. Los aditivos en polvo se deben almacenar como el cemento siendo, normalmente, menos sensibles a las temperaturas, más no a la humedad.

Una vez añadidos los aditivos a la mezcladora, hay que proveer el suficiente tiempo de mezcla, para que se distribuya de manera uniforme en toda la masa y actúe homogéneamente. Los aditivos líquidos se dosifican con parte del agua de mezclado,

mientras que los polvos, en hojuelas con el cemento.

En general, hay que tener en cuenta todas las recomendaciones del fabricante para cada producto, incluidos los protocolos de seguridad.

6.4 Referencias y bibliografía recomendada

6.1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Chemical Admixtures For Concrete ASTM C494 – 08. Editorial Staff, Easton, 2010.

6.2. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Chemical Admixtures for Concrete. Committee 212. Farmington Hills, 2009.

6.3. CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. Concrete Technology and Construction Admixtures. London, C&CA, 1984.

6.4. CEMENTO HORMIGÓN. Aditivos para Grandes Obras de Hormigón. Revista N° 774. IECA, Madrid, 1997.

6.5. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. NTC 1299 Aditivos Químicos para Concreto. Bogotá, ICONTEC, 2000.

6.6. INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. Guía para el Empleo de Aditivos en el Concreto (Reporte preparado por el Comité ACI 212). IMCYC, México, 1974.

6.7. MATA LLANA R. Fundamentos de Concreto Aplicados a la Construcción. ICPC. Bogotá, 2007.

6.8. NEVILLE, A. M. Tecnología del Concreto. IMCYC, México, 1999.

6.9. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Illinois, PCA, 2004.

6.10. REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE – NSR – 10. Asociación de Ingeniería Sísmica. AIS, Bogotá, 2012.

6.11. SANDINO, A. Materiales para Estructuras. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, 1981.

7

Propiedades del concreto

Las propiedades del concreto se dividen en las de estado fresco y las de estado endurecido. Ambas son importantes para un concreto de buena calidad.

El concreto es una roca artificial con dos estados muy definidos: el fresco y el endurecido. El primero, a pesar de ser transitorio, es de gran trascendencia para el desarrollo de todas las propiedades en estado endurecido, en especial la resistencia y la durabilidad.

El concreto en estado fresco presenta una consistencia plástica, característica que paulatinamente se pierde, dando inicio al endurecimiento, con lo que progresivamente adquiere las características de sólido. La interfase en los dos estados es el fraguado, proceso que también reviste particular importancia en la construcción de obras en concreto.

El interés por el estudio de las propiedades ha sido permanente. La tendencia actual es la de especificar requisitos particulares del concreto que, además de cumplir con una determinada resistencia, aseguren la durabilidad a exposiciones específicas, y se dispongan otras características particulares, tales como: la densidad (liviano, normal, alta); permeabilidad al agua, permeabilidad a cloruros, entre otros. Por ello, el conocimiento de las propiedades es relevante en la tecnología del concreto, siendo un factor fundamental para el diseño de la mezcla y el desempeño de la estructura.

7.1 Concreto fresco

La tendencia actual, cuando se hace referencia al concreto fresco, es hablar de la "Reología", ciencia relativamente nueva que corresponde a la parte de la física que trata del estudio de la viscosidad, la plasticidad, la elasticidad y, en general, del flujo de la mezcla.

No obstante, dada la compleja composición de los materiales del concreto, es difícil establecer un método exacto para predecir su flujo. Por esta razón, para el concreto en estado fresco, generalmente se hace referencia a la trabajabilidad o manejabilidad, que en cierta medida contempla la reología del material.

7.1.1 Manejabilidad

*La **manejabilidad**, también llamada trabajabilidad, se puede definir como el grado de facilidad con que el concreto puede ser mezclado, transportado, colocado, compactado y terminado, sin que pierda su homogeneidad (que no se segregue ni exude).*

La manejabilidad es una combinación de varias propiedades, como la compactabilidad, la movilidad, la cohesividad, la consistencia y la plasticidad. La compactabilidad se refiere a la facilidad con la que el aire atrapado en la mezcla puede ser expelido. La movilidad es la facilidad con la que la mezcla puede fluir alrededor del acero de refuerzo y de las formaleas. La cohesividad es la resistencia de una mezcla de concreto a la segregación o a la exudación. La consistencia se refiere

re al grado de humedad de la mezcla o al grado de sequedad o fluidez. Y la plasticidad, es la propiedad que le permite a la mezcla ser moldeada y cambiar de forma, lentamente, cuando es colocada en estado fresco.

Factores que afectan a la manejabilidad

En la manejabilidad de una mezcla de concreto influyen gran cantidad de factores, siendo el más importante la cuantía de agua, que le da la fluidez. También la afecta la gradación, forma y textura superficial de los agregados; el contenido de aire incorporado, tipo de aditivos usados, especialmente los reductores de agua o plastificantes; las cantidades relativas de pasta y agregados, y la relación arena/agregado total; entre otros. La influencia dada por las propiedades de los agregados, el contenido de aire, y los aditivos, fueron presentados en detalle en los capítulos precedentes.

La fluidez de la pasta depende de las cantidades relativas de agua y material cementante, pues ella es la que facilita el movimiento de los agregados, cuando la mezcla se encuentra en estado fresco. Pastas con bastante material cementante y poca agua se tornan rígidas y poco trabajables, pues hay escaso "lubricante" entre las partículas de agregado. Por el contrario, pastas con contenidos bajos de material cementante y altas cuantías de agua se convierten en mezclas fluidas, pero con tendencia a la segregación y a la exudación. De modo que, entre más agua tenga la pasta, el espacio entre las partículas de cemento es mayor, formándose así pastas con estructuras pobres, trayendo como consecuencia bajas resistencias, alta permeabilidad y afectaciones nocivas a la durabilidad.

Otros factores externos que afectan la manejabilidad son: el método de mezclado; tipo de transporte; sistema de colocación; método de compactación; tipo de acabado; la temperatura ambiente y del concreto; así como el tiempo entre el mezclado y la colocación de la mezcla. Los primeros cinco son estudiados en el Capítulo de Producción del Concreto.

La temperatura ambiente influye en la manejabilidad, de forma que, entre más cálido, mayor será la cantidad de agua requerida por la mezcla para mantener una manejabilidad constante, aunque en mezclas rígidas no es tan notorio. El efecto de la temperatura en la mezcla es muy importante. Normalmente se establece que la entrega del concreto no exceda los 32 °C, si bien proyectos específicos pueden requerir temperaturas menores.

Medida de la manejabilidad

Como se aprecia en la definición, realizar la medida de la manejabilidad en una mezcla es muy difícil, pues median muchos factores. Aunque no se ha creado todavía una prueba admisible que la mida en forma directa, se han desarrollado numerosos procedimientos que proporcionan información útil acerca de la manejabilidad.

Prueba del asentamiento

La prueba de asentamiento, también llamada *Slump* o Revenimiento o del Cono de Abrams (en honor a su inventor, Duff Abrams) es, tal vez, la prueba más usada en el mundo. Fundamentalmente, mide la consistencia o grado de humedad de una mezcla.

El ensayo, cuyo procedimiento se relaciona en la norma NTC 396 (ASTM C143M), utiliza un molde de metal o plástico con la forma y dimensiones mostradas en la Figura 7.1. Si la mezcla tiene un agregado con TMN superior a 37,5 mm, se debe tamizar por una malla de este tamaño y eliminar el agregado retenido. El método no es aplicable a concretos con asentamiento menores a 15 mm, ni mayores a 230 mm, que pueden no ser adecuadamente plásticos, o no cohesivos, respectivamente.

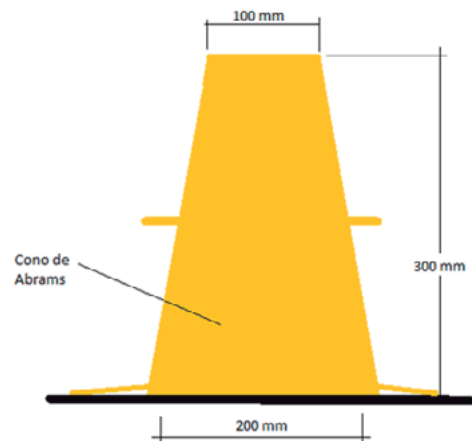


Figura 7.1. Cono de Abrams para prueba de asentamiento *

La secuencia de la prueba se muestra en el esquema de la Figura 7.2. Consiste en colocar el molde sobre una superficie horizontal, plana y no absorbente, presionando con los pies las agarraderas inferiores para evitar que la pasta se fugue. El cono se llena en

tres capas con igual volumen, aproximadamente, compactando cada una con 25 golpes, dados con una varilla lisa de 16 mm (5/8") de diámetro, 60 cm de longitud y con el extremo redondeado. La penetración de la varilla se hace en diferentes sitios de la superficie, paralela a la pared del cono, y hasta una profundidad tal, que penetre aproximadamente 25 mm la capa inmediatamente inferior.

Al término de la compactación de la tercera capa se enrasa la superficie, bien sea con la varilla o con un palustre. Se retira la mezcla que haya caído al suelo, en la zona

adyacente a la base del molde y se retira el cono en forma continua, en un lapso entre 3 a 7 segundos. El molde se retira levantándolo cuidadosamente, en dirección vertical, sin movimientos laterales o de torsión y sin tocar la mezcla con el molde cuando este se ha separado del concreto. La realización del ensayo completo, desde el comienzo del llenado, debe hacerse en un tiempo menor a 2,5 minutos.

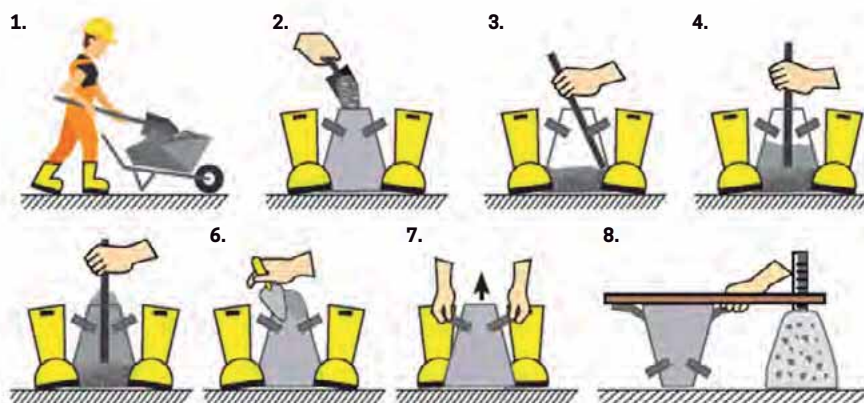


Figura 7.2. Procedimiento de ensayo de asentamiento*

Retirado el molde, la muestra sufre un asentamiento que se mide inmediatamente, tomando la diferencia entre la altura del molde y la altura medida sobre el centro de la base superior del espécimen. Se reporta la medida con una aproximación de 5 mm.

Si se produce un desprendimiento pronunciado de parte del concreto hacia un lado de la muestra (Figura 7.3, b), se debe repetir el ensayo sobre otra muestra diferente.

Si el desprendimiento persiste, como puede suceder con mezclas ásperas, es un indicio de que a la mezcla le falta cohesión y que puede tender a la segregación. En este caso, el ensayo no es aplicable. En el evento que la mezcla sufra un colapso, luego de retirado el molde (Figura 7.3, c), tampoco es aplicable el ensayo.

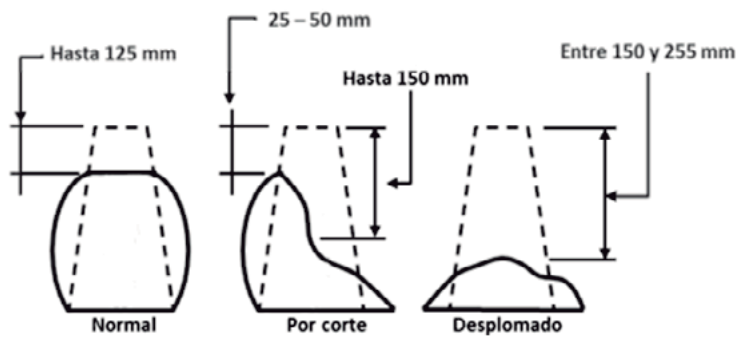


Figura 7.3. Formas de flujo del concreto en el ensayo de asentamiento

Pruebas para mezclas muy fluidas

Debido al desarrollo de concretos muy fluidos, como el autocompactante, en el que la prueba del cono de Abrams no aplica por las limitaciones mencionadas, se han desarrollado otros ensayos, como los descritos a continuación.

▪ **Ensayo del flujo de asentamiento (Slump flow)**

El ensayo de flujo de asentamiento es el más empleado actualmente para medir la manejabilidad de concretos muy fluidos, como el autocompactante. Emplea una variación del cono de Abrams, llenándolo completamente en una sola capa y sin compactación. Una vez enrasado, se levanta el cono y se mide cuánto se desplaza horizontalmente el concreto (Figura 7.4). Para el concreto autocompactante, el desplazamiento puede variar entre 455 y 810 mm (18 y 32 pulgadas).

A través de este ensayo se puede determinar la resistencia a la segregación, mediante el Índice de Estabilidad Visual - VSI (por sus siglas en inglés). Se observa si en el centro del concreto extendido tiende a quedar concentrado el agregado grueso, o si en el borde se nota agua de exudación. Un VSI con valor de cero, significa que son concretos altamente estables; y VSI es de 3, para concretos con estabilidad inaceptable.

También, se puede estimar la viscosidad de la mezcla por medio de la medición del tiempo que tarda el concreto en extenderse hasta un diámetro de 500



Figura 7.4. Ensayo de flujo de asentamiento (Slump Flow) †

mm, desde el momento en que se levanta el cono. Este parámetro es conocido como T50 y varía entre 2 y 10 segundos. Un valor alto del T50 significa que se trata de un concreto de mayor viscosidad, mientras que valores bajos de T50 son concretos de menor viscosidad.

▪ **Ensayo de la caja en L**

El ensayo de la caja en L es empleado en el laboratorio para el desarrollo o precalificación de concretos muy fluidos. Consiste en llenar con concreto el lado vertical de la caja, abrir una puerta y permitir que el concreto fluya a través de unas barras (Figura 7.5). Se observa el desplazamiento en la parte horizontal, cómo se acomoda, y la facilidad que tiene el concreto para pasar por entre las barras.

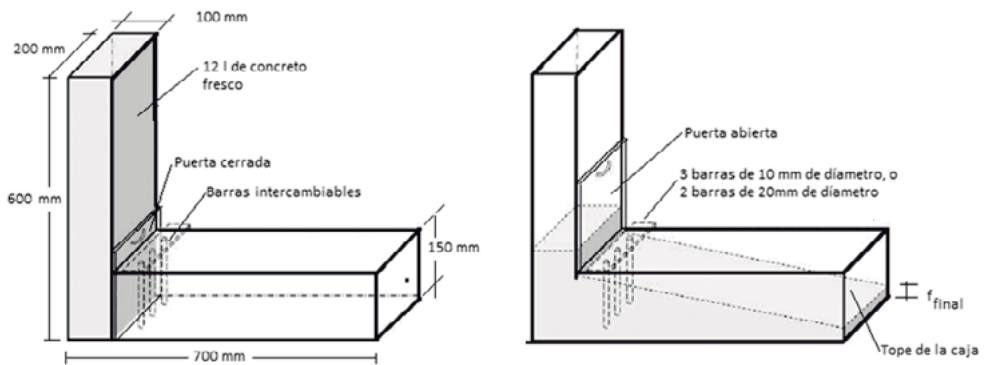


Figura 7.5. Ensayo de Caja - L †

▪ Ensayo de anillo J (J-ring)

El ensayo de anillo J, también conocido como ensayo de la Jaula, es otra variación de la prueba de asentamiento, donde se coloca una jaula de barras alrededor del cono de Abrams, que simula una estructura con mucho refuerzo (Figura 7.6). Mediante observación, se mide la habilidad de la mezcla para desplazarse a través de las

barras, sin segregación. Al igual que el ensayo de la caja - L, es empleado en el laboratorio para el desarrollo o precalificación de mezclas de concreto muy fluidas. Su procedimiento se encuentra estandarizado en la norma ASTM C1621.

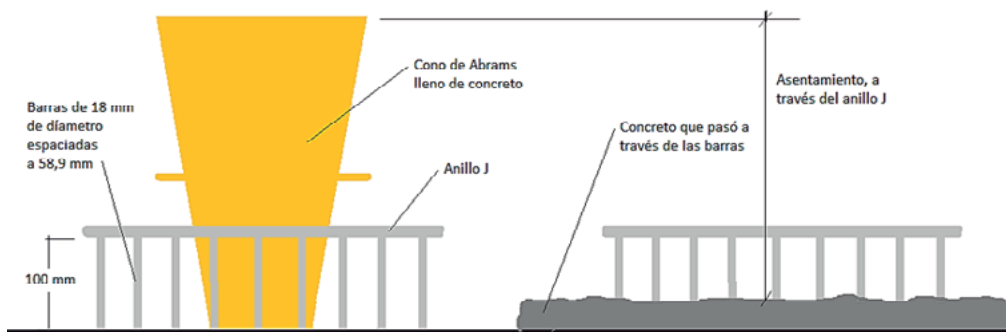


Figura 7.6. Ensayo de Anillo - J †

Pruebas para mezclas muy secas

▪ Ensayo de Vebe

Al contrario de los anteriores, el ensayo Vebe es una prueba diseñada para medir la manejabilidad de mezclas muy secas, de asentamiento menor a 20 mm. Su nombre se debe a las iniciales de su creador, el sueco V. Bährner. Consiste en contar el tiempo que tarda una muestra

de concreto elaborada con el cono de Abrams, montada sobre una mesa vibratoria, para que cubra completamente la tapa del molde cilíndrico que la contiene (Figura 7.7). Los tiempos normales para mezclas secas (Tiempo de Vebe) se encuentran entre 3 y 30 segundos.

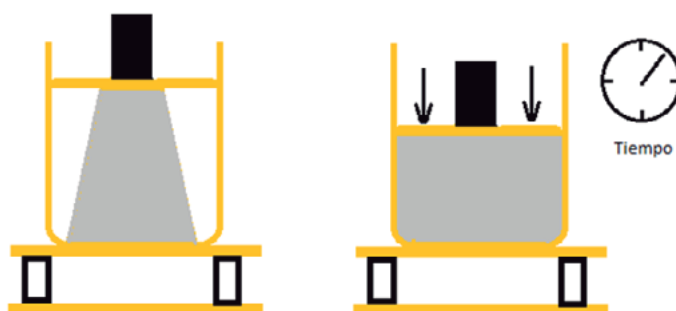


Figura 7.7. Ensayo de Vebe †

Este ensayo supone que la entrada de energía requerida para la compactación, es una medida de la trabajabilidad de la mezcla. Su campo de aplicación se encuentra en técnicas como la del concreto compactado con rodillo (CCR), cuyo uso principal son las presas y los pavimentos rígidos. También es usado en concretos para prefabricación.

▪ Prueba de la esfera de Kelly

El ensayo de la esfera de Kelly consiste determinar la

profundidad a la que se hunde una semiesfera de metal, de 152 mm de diámetro y un peso de 13,6 kg, sobre una muestra de concreto fresco (Figura 7.8). El recipiente que contiene la muestra de concreto debe proveer una capa de al menos 20 cm y en el que la menor dimensión lateral sea de 46 cm.

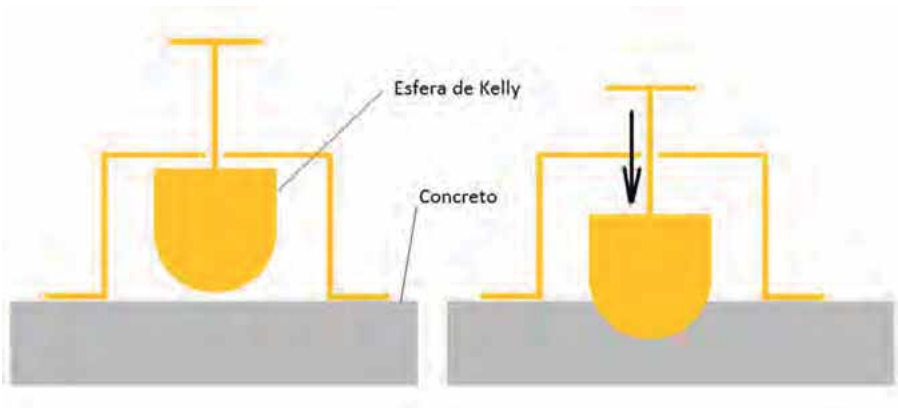


Figura 7.8. Esfera de Kelly †

La profundidad de hundimiento depende del rozamiento interno, correlacionada con la manejabilidad de la mezcla. Tiene la ventaja de poderlo realizar en el concreto puesto en obra y su rango de aplicación parecido al del ensayo de asentamiento, existiendo entre las dos pruebas una buena correlación. Su pro-

cedimiento de ensayo se encuentra normalizado en la ASTM C360.

En la Tabla 7.1, se muestran algunos valores que relacionan la manejabilidad de la mezcla para los ensayos de asentamiento, el aparato de Vebe y la esfera de Kelly.

Tabla 7.1. Relación de la medida de manejabilidad según algunos ensayos (7.8)

Ensayo	Manejabilidad				
	Muy baja	Baja	Media	Media Alta	Alta
Asentamiento (cm)	0 a 1,0	2,0 a 3,0	4,0 a 6,0	7,0 a 9,0	10,0 a 12,0
Prueba Vebe (s)	5,0 a 10,0	3,0 a 4,0	1,0 a 2,0	-	-
Esfera de Kelly (cm)	0,5	1,0 a 1,5	2,0 a 3,0	3,0 a 5,0	5,0 a 6,0

7.1.2 Segregación

La segregación es la separación de los componentes de una mezcla heterogénea, de manera que su distribución pierde uniformidad.

En el caso del concreto, las principales causas son la diferencia en el tamaño y la densidad de los constituyentes, así como una mala granulometría de los agregados. También influye un excesivo mezclado, un inadecuado sistema de transporte, la colocación deficiente y el exceso de vibración durante la compactación.

Típicamente, la segregación se puede presentar de dos formas. La primera ocurre cuando se usan mezclas pobres (escaso contenido de cemento) y demasiado secas, de modo que la falta de cohesividad entre las partículas tienden a separarse. La segunda, contrario a la anterior, sucede en mezclas muy húmedas, manifestándose por la separación entre la pasta y los agregados.

Las siguientes son algunas acciones que pueden ayudar a evitar o disminuir el riesgo de segregación:

En la mezcla:

- Dosificar adecuadamente los materiales, usando agregados bien gradados, y sin utilizar gravas cuya densidad difiera apreciablemente de la arena, excepto para los concretos livianos, tal como se estudia en el Capítulo 10.
- Usar incorporadores de aire incrementa la cohesión de la mezcla.
- Realizar el mezclado en equipos idóneos y bien mantenidos.

Al transportar en concreto:

- Acarrearlo la menor distancia posible hasta la posición final, por caminos que no produzcan exceso de vibración en la mezcla.
- Evitar cambios bruscos de dirección.

Al colocar el concreto, evitar:

- La caída libre, desde alturas mayores a 1,5 m.
- El descargue contra obstáculos.
- Que fluya tramos largos por la formaleta.
- Esparcir la mezcla con el vibrador.
- No exceder el tiempo de vibración del concreto.

En el Capítulo de Producción del Concreto se estudian con más detalle los factores que motivan la segregación y cómo evitarla. El ACI 304 presenta una completa gama de recomendaciones.

La medida de la segregación no es fácil de cuantificar, pero mediante la observación de algunas pruebas se puede determinar. El ensayo de fluidez (BS 1881), que consiste en sacudir una muestra de concreto sobre una tabla cuadrada, de 70 cm de arista y que se encuentra abisagrada a otra por uno de sus extremos, permite ver si las partículas más gruesas tienden a colocarse al borde de la tabla, significando que la mezcla no es cohesiva. También es posible ver otra forma de segregación, con mezclas muy pastosas, cuando la pasta de cemento tiende a salir hacia los lados de la tabla, dejando el agregado.

7.1.3 Exudación

La exudación, también conocida como “sangrado”, se presenta cuando parte del agua de mezclado sube a la superficie del concreto recién colocado.

Esta situación se debe a que el agua tiende a colocarse en la parte superior, y los constituyentes sólidos no pueden retenerla toda durante el proceso de fraguado. Por ello se considera a la exudación como una forma de segregación.

El fenómeno de la exudación tiene lugar durante las pri-

meras 3 horas después de colocado el concreto. En tiempo húmedo, frío y sin viento, el agua exudada se puede apreciar en la superficie. En clima caluroso, seco y con viento, el agua exudada se evapora más rápido de lo que sale, produciéndose, un resecado en la superficie, con la consecuente formación de fisuras por contracción plástica.

En efecto, la exudación de la mezcla trae consecuencias nocivas a la estructura. Por un lado, en la superficie del concreto se forma una capa débil al endurecer, siendo especialmente sensibles aquellas sujetas a abrasión, como es el caso de las losas de pisos y los pavimentos. Por otro lado, en su ascenso, el agua puede quedar atrapada debajo de las partículas gruesas de agregado o del acero de refuerzo, generando zonas de baja adherencia y resistencia.

Este fenómeno se puede controlar con el cemento, bien sea aumentando su cuantía, o eligiendo aquellos con mayor finura de molido, o que contenga un alto contenido de álcalis o de C_3A . También se puede controlar con el incremento de partículas finas de agregado (arenas con cerca del 15% de material que pasa el tamiz de 150 μm); con la utilización de incorporadores de aire o materiales cementantes suplementarios finamente molidos (puzolanas como humo de sílice, metacaolín, escoria o cenizas). El empleo de aditivos reductores de agua, asimismo, es una solución válida. Prácticas como el retraso de las operaciones de acabado, el uso de llanas de madera y evitar un acabado excesivo en la superficie, han demostrado ser efectivas para mitigar la exudación.

Pero la exudación no siempre es perjudicial. Cuando las losas de los pisos van a ser tratadas con un endurecedor en polvo, se requiere de una cantidad de agua para su reacción. También, en los concretos que son tratados al vacío, la remoción del agua se facilita por la exudación. El procesamiento al vacío del concreto es una técnica que se aplica a las superficies del concreto fresco, con el fin de

extraer parte del agua, alrededor del 40%, de modo que se produce un efecto de concreto “endurecido superficialmente”.

La medición de la exudación se puede realizar por medio de los procedimientos dados en la norma ASTM C232. También se puede determinar experimentalmente.

7.2 Tiempo de fraguado

Para que el concreto se pueda utilizar en la construcción, la mezcla en estado fresco debe permanecer lo suficientemente plástica durante un tiempo adecuado, para que se puedan realizar las actividades de mezcla, transporte, colocación, compactación y acabado. Por ello resulta útil conocer el punto en que el concreto pasa de estado plástico a rígido.

*El **fraguado del concreto** se puede definir como el primer paso de solidificación de una mezcla de concreto fresco. De manera arbitraria se han establecido los tiempos de fraguado inicial y final, que son meramente funcionales, sin que marquen un cambio específico en las características físico-químicas en la pasta de cemento.*

El tiempo inicial define el límite del manejo del concreto, es decir, el tiempo que se dispone para el mezclado, transporte, colocación, compactación y acabado. Mientras que el tiempo final proporciona de forma aproximada el tiempo del comienzo del desarrollo de la resistencia mecánica.

Se han establecido varios métodos para su medición, siendo el más utilizado el de la resistencia a la penetración, cuyo procedimiento se relaciona en la NTC 890 (ASTM C403). Consiste en tomar una muestra de mortero, procedente del tamizado en la malla 4,76 mm (Nº 4) de una muestra del concreto fresco. Se coloca en un recipiente cilíndrico, para someterla a esfuerzos de penetración a diferentes tiempos, con émbolos de extremo plano cuyas áreas varían entre 16 y 645 mm² (Figura 7.9). Se mide el esfuerzo necesario para penetrar el émbolo a una profundidad de 25 mm, de manera que, con la fuerza de penetración, el área del émbolo y el tiempo en el que se hace la medición, se dibuja una curva como la mostrada en la Figura 7.10.



Figura 7.9. Equipo digital para medir el tiempo de fraguado del concreto †

Se define como tiempo de fraguado inicial, aquel en que la resistencia a la penetración es de 3,5 MPa (35 kg/cm² ó 500 psi). Como tiempo de fraguado final aquel en que la resistencia a la penetración es de 28 MPa (280 kg/cm² ó 4.000 psi). La penetración de 3,5 MPa, corresponde a la “vibración límite”. Después de

ella el concreto no puede replastificarse por vibración o remezclado. El valor de 28 MPa, corresponde a la resistencia a la compresión de un cilindro de concreto estándar, de aproximadamente 0,7 MPa (7 kg/cm² o 100 psi).

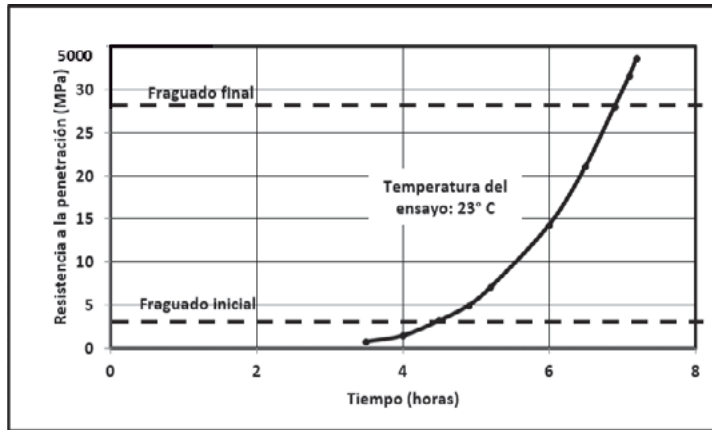


Figura 7.10. Ejemplo para la determinar el tiempo de fraguado del concreto

El tiempo de fraguado del concreto depende de varios factores como el tipo de cemento, la relación agua - material cementante, el contenido de aditivos y la temperatura ambiente. Por su parte, los concretos con relaciones agua - material cementante más altas, son mezclas con tiempos de fraguado más prolongados. Así mismo, los aditivos acelerantes o retardantes harán su efecto dependiendo del tipo, marca y cuantía del aditivo usado. En la Figura 7.11, se enseñan dos curvas de fraguado de una misma mezcla, medidas a dos temperaturas di-

ferentes. Se puede apreciar que, a mayor temperatura, menor será el tiempo de fraguado.

Es preciso aclarar que el tiempo de fraguado del cemento es diferente al del concreto, aunque pueden correlacionarse con el del mortero. Y el tiempo de fraguado del mortero es diferente al del concreto.

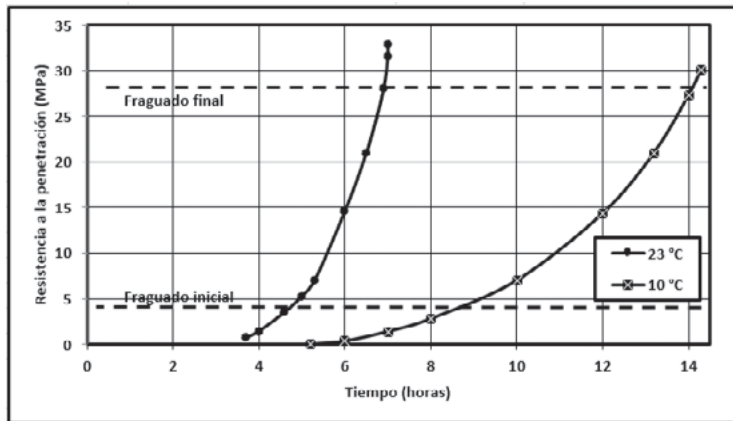


Figura 7.11. Influencia de la temperatura ambiente sobre el tiempo de fraguado

7.3 Concreto endurecido

Como ya se ha presentado, el concreto es un material que experimenta un progresivo y creciente endurecimiento, pasando de estado plástico a sólido, mediante una cadena de acciones físico-químicas complejas a través del tiempo. Durante este proceso desarrolla una serie de propiedades que

son aprovechadas en la construcción, tales como la resistencia, durabilidad, estabilidad de volumen, resistencia al fuego, entre otras.

En general, se considera que la resistencia es la propiedad más importante y que influye en las demás características. Concretos

con altas resistencias tienen mayor densidad, son menos permeables y más durables. Pero, por el contrario, estos concretos tienden a tener una mayor contracción por fraguado y mayor probabilidad de fisurarse.

7.3.1 Resistencia

La resistencia de un material se puede definir como la habilidad para resistir esfuerzos sin que falle. En el caso del concreto, la resistencia está relacionada al esfuerzo requerido para causar fractura, es decir, cuando el esfuerzo aplicado alcanza su máximo valor. El concreto es muy resistente a los esfuerzos de compresión y por lo general esta es la propiedad con la que se diseña y se hace el control de calidad.

La resistencia a la compresión: es el esfuerzo de falla del concreto, medido como el promedio de la resistencia de dos cilindros estándar (150mm de diámetro), o tres cilindros de 100mm de diámetro, determinada a una edad de 28 días o menos. En la construcción de obras de ingeniería ambiental, se suelen especificar edades mayores para determinar la resistencia a la compresión.

Como se mencionó en el Capítulo 1, la resistencia a los esfuerzos de tracción y corte son pequeños comparados con los de compresión, deficiencia que se compensa con la introducción del acero de refuerzo. La resistencia del concreto reforzado se debe básicamente a la similitud que existe entre los coeficientes de dilatación térmica (0,012 mm/m por °C del acero y 0,010 mm/m por °C del concreto) y a la adherencia física, química y mecánica que se presenta entre los dos materiales.

Relación agua/cementante

No se puede hablar de la resistencia del concreto

sin hacer referencia a uno de los factores que constituye la base de la tecnología del concreto moderna, como es la regla de la relación agua/cemento (a/c). En 1918, el investigador norteamericano Duff Abrams encontró que la relación existente entre la relación a/c y la resistencia del concreto, asumiendo un concreto perfectamente compactado, empleando materiales con las mismas características y condiciones de ensayo, está representada por la Ecuación 7.1.

$$f'c = A/B^{(a/c)} \quad \text{Ecuación 7.1}$$

Donde:

A y B: son constantes empíricas o coeficientes numéricos, que dependen de la calidad de los materiales, edad del concreto, sistema de curado y condiciones de ensayo; entre otros.

f'c: es la resistencia del concreto.

a/c: es el cociente entre el peso del agua de mezclado (a) y el peso del cemento empleado (c).

Tal como concluyó Abrams, la curva de la Figura 7.12 muestra la correspondencia entre la relación a/c y la resistencia (f'c), para una determinada edad y condiciones de curado. Esto significa que, entre mayor sea el contenido de agua de mezclado, mayor es la cantidad de agua que no se combina con el cemento y, por consiguiente, al disiparse la parte de agua evaporable, la pasta será más porosa, menos resistente, más permeable, menos densa y menos durable.

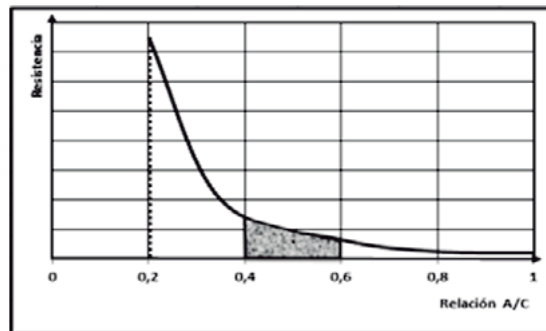


Figura 7.12. Curva típica de relación a/c

También, se evidencia la forma exponencial de la caída en la resistencia del concreto en la medida que aumenta la relación a/c. La zona achurada representa los valores de relación a/c normalmente usados para diseños de mezcla de concreto.

Si se completa la curva definida por Abrams (punteada), se aprecia que la curva no es puramente exponencial, pues para valores de relación agua cemento menores a 0,2, la resistencia del concreto decrece hasta un valor de cero, debido a la insuficiencia de agua para hidratar el cemento.

El desarrollo de la tecnología del concreto se ha venido centrando en la producción de mezclas que, además de alta resistencia a la compresión, tengan alta durabilidad, alta densidad, muy baja permeabilidad y alto módulo, entre otras propiedades. Esto ha sido posible gracias a las bondades técnicas, económicas y medioambientales de los materiales cementantes suplementarios (puzolanas, escorias, metacaolín, microsílíce), tal como se estudió en el capítulo de cemento, así como a la industria de los aditivos que han permitido su empleo. En tal sentido, y dado el uso generalizado de los materiales cementantes suplementarios, hay quienes prefieren empleo del concepto relación agua – material cementante (a/mc), donde se incluye el cemento y los materiales cementantes suplementarios.

Naturaleza de la resistencia del concreto

La resistencia del concreto depende básicamente de:

- La porosidad.
- La resistencia de la pasta endurecida.
- La resistencia propia de las partículas del agregado.
- La adherencia entre la pasta y los agregados.

La porosidad se encuentra relacionada con la suma del volumen de todos los vacíos dentro del concreto, como son: el aire atrapado, los poros capilares, los poros de gel y el aire incluido (en caso de haberlo), aspectos estudiados anteriormente en los Capítulos de Cemento, Aire y Agua, respectivamente.

La resistencia de la pasta tiene su origen en el complejo proceso de hidratación del cemento. La resistencia será mayor en la medida que se incremente el grado de hidratación.

Como se anotó en el Capítulo de Agregados, estas partículas tienen una resistencia que le es trans-

mitida al concreto. Así, al formar una masa endurecida con la pasta, aportan parte de la resistencia mecánica.

La adherencia tiene lugar durante los procesos de fraguado y endurecimiento de la pasta, en donde se genera una trabazón física y mecánica con la superficie de los agregados, teniendo gran influencia la forma y la textura de las partículas de agregado. Su zona de contacto (zona de transición de fases), normalmente es uno de los aspectos más importantes de la resistencia del concreto, pues se constituye en el elemento más débil de la masa endurecida.

Factores que influyen en la resistencia

Además de la relación agua/cemento, que como se mencionó es el factor más importante, existen otros elementos que inciden en la resistencia, como son, entre otros:

- La granulometría, la textura superficial, la forma, la resistencia, y el tamaño máximo de los agregados.
- El tipo y calidad del cemento.
- La calidad del agua.
- El tipo y cantidad de aditivos.
- La temperatura del medio ambiente.
- El proceso de fraguado.
- La edad del concreto.
- Tipo y cantidad de cemento.

Tal como se estudió, los distintos tipos de cemento producen diferentes resistencias con la edad. De igual manera, dentro del mismo tipo y entre las diferentes marcas de cemento, existen diferencias en el desarrollo de la resistencia. Por ello, las especificaciones exigen que si se cambia el tipo o marca de cemento, se deben realizar mezclas de prueba con los materiales que se van a emplear, para determinar el efecto que dicho cambio pueda tener sobre la resistencia y otras propiedades del concreto.

La cantidad usada en la mezcla también es importante. Como principio general se cumple que, a mayor contenido de cemento, mayor resistencia. No obstante, se ha encontrado que para mezclas ricas en cemento (mayores que 500 kg/m³), baja relación agua/cemento y el uso de agregados grandes, la resistencia puede verse afectada, debido a

que los esfuerzos de contracción, son restringidos por las partículas de agregado, lo que genera agrietamiento de la pasta y la pérdida de adherencia con el agregado.

Características de los agregados

En general, para una misma relación agua/cemento, las partículas de agregado con textura rugosa y de forma angular tienen una mejor adherencia con la pasta, de modo que pueden llegar a conformar concretos más resistentes, que otros con agregados de forma redondeada y textura lisa. No obstante, para igual contenido de cemento y una determinada manejabilidad, las partículas rugosas y angulosas exigen mayor cantidad de agua, por lo que la resistencia se disminuye.

Una masa de agregados con granulometría continua, permite elaborar mezclas más compactas, más densas, menos permeables y, por tanto, más resistentes y más durables.

En general, la diferencia en TMN de un mismo tipo de agregado bien gradado, tiene dos efectos opuestos en la resistencia a la compresión del concreto. Por un lado, para una consistencia dada e igual contenido de cemento, el uso de TMN grande implica menor requerimiento de agua de mezclado, que para agregados de TMN más pequeños, en razón a que tienen menor superficie específica. De otra parte, mezclas con la misma consistencia e igual relación agua/cemento, presentan resistencias menores cuando se utilizan agregados de TMN mayor. En particular, los concretos de alta resistencia exigen TMN pequeños, mientras que, para concretos de baja resistencia, entre mayor sea el TMN, mejor será la eficiencia.

Agua y aditivos

El efecto del agua y los aditivos en la resistencia del concreto, fueron discutidos en los respectivos capítulos.

Fraguado y temperatura

La temperatura ambiente a la que está expuesta la mezcla puede afectar el desarrollo de la resistencia del concreto. En climas fríos, con temperaturas menores a 10°C, el proceso de hidratación del cemento es más lento, ocasionando retrasos en el tiempo de fraguado y en la consecuente adquisición de resistencia.

Por el contrario, cuando se trata de altas temperaturas, la resistencia del concreto presenta un incremento a edades tempranas pero, posteriormente se ve afectada, toda vez que una rápida hidratación inicial forma granos con estructuras hidratadas muy pobres y pastas más porosas.

Curado del concreto

Como se vio en el Capítulo de Cemento, luego del proceso de fraguado del concreto, es necesario suministrarle agua adicional para continuar la hidratación del cemento y procurar conseguir la máxima resistencia. Dada la importancia que reviste este proceso, más adelante se le dedica un capítulo para su estudio.

Edad del concreto

El concreto es un material que aumenta la resistencia con la edad. En la medida que los granos de cemento se encuentren más hidratados, mayor resistencia se consigue. Como se vio en el Capítulo de Cemento, la velocidad de hidratación es muy rápida a edades iniciales pero va desacelerando con el transcurso del tiempo. Sin embargo, se asume que la resistencia a la compresión es la medida a los de 28 días. La Figura 7.13 y la Tabla 7.2 dan una idea del desarrollo aproximado de la resistencia a la compresión con la edad.

Tabla 7.2. Desarrollo aproximado de la resistencia a la compresión del concreto con la edad, asumiendo 100% a 28 días

Edad (días)	% Resistencia respecto a la de 28 días
1	10
3	40
7	70
14	90
28	100
56	110
90	120
180	125

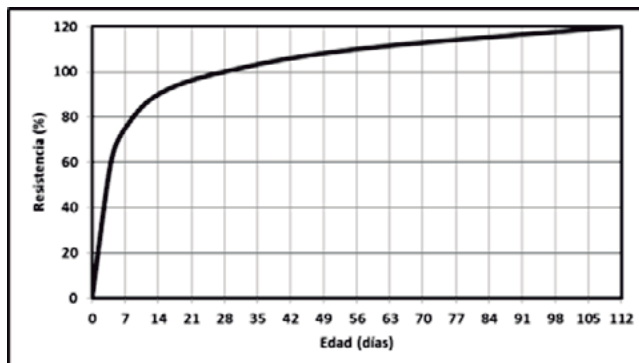


Figura 7.13. Desarrollo aproximado de la resistencia del concreto con la edad

Medida de la resistencia

La resistencia es una propiedad física del concreto y se usa principalmente para diseño de estructuras. Como se mencionó en el capítulo introductorio, el concreto resiste bastante bien los esfuerzos de compresión y generalmente se relaciona como su propiedad más importante. Para propósitos de diseño estructural, se parte de que el concreto resiste los esfuerzos de compresión y de cortante, mientras que los esfuerzos de tracción son absorbidos por el acero de refuerzo.

La medida de la resistencia a la compresión del concreto es una de las pruebas más importantes, pues sus resultados son la base del control de calidad de concretos en:

- Operaciones de dosificación, mezcla y colocación.
- Determinación del cumplimiento de las especificaciones.
- Control para la evaluación de la efectividad de los aditivos.

En ocasiones, también se especifican otras pruebas de resistencia como la flexión o módulo de rotura (para losas sobre el terreno, como pavimentos y pisos de concreto) o la tracción.

Elaboración de las probetas para la medida de la resistencia a la compresión

En general, la medida de la resistencia a la compresión se efectúa mediante probetas cilíndricas, cuyos procedimientos de elaboración y ensayo se encuentran estandarizados en la NTC 550 y NTC 673, respectivamente. Las dimensiones de las probetas cumplen con una relación de esbeltez de 1:2 (diámetro: altura), siendo las más frecuentemente usadas las de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, y las de 100 mm de diámetro

por 200 mm de altura.

Se usan moldes de acero, plástico o un material no atacable por el cemento y que no se deforme. La elaboración se realiza llenando el molde con la muestra de concreto fresco en 2 ó 3 capas de aproximadamente igual altura. Cada capa se compacta con una varilla o un vibrador. Si se usa varilla, debe ser lisa y de punta redondeada, aplicando 25 golpes en diferentes sitios de la superficie del concreto. La longitud y diámetro de la varilla, así como el número de capas, depende del tamaño de los cilindros, tal como se aprecia en la Tabla 7.3 y Tabla 7.4. Si se emplea vibrador se llena en 2 capas, compactando cada una con un número de inserciones que depende del diámetro del cilindro, tal como se enseña en la Tabla 7.5.

Tabla 7.3. Tamaño de la varilla a usar para elaboración probetas

Diámetro del cilindro o ancho de la vigueta, mm	Diámetro de la varilla, mm
< 150	10 ± 2
≥ 150	15 ± 2

Tabla 7.4. Número de capas y de golpes por capa a aplicar en la compactación con varilla

Diámetro del cilindro, mm	N° capas	N° golpes/capa
100	2	25
150	3	25
225	4	50

Tabla 7.5. Número de inserciones para diferentes tamaños de cilindros en la compactación con vibrador

Diámetro cilindro, mm	N° capas	N° inserciones del vibrador/capa
100	2	1
150	2	2
225	2	4

La compactación con varilla es la más común (Ver Figura 7.14). Exige que la capa de fondo se compacte en toda su profundidad, mientras que, en las superiores, la varilla debe penetrar ligeramente la capa adyacente. Una vez terminada la compactación se completa el molde con más mezcla y se enrasa la superficie con un palustre o cualquier otro instrumento adecuado. Elaborados los especímenes se les golpea en las paredes con un martillo de caucho, con el fin de eliminar la mayor cantidad de burbujas de aire que pueden haber quedado atrapado dentro de la masa de concreto.

Posteriormente se marcan los cilindros y se tapan con un material no absorbente. Se dejan en un sitio con humedad relativa superior al 50% y a una temperatura entre 16 °C y 27 °C. Para concretos con resistencias ≥ 40 MPa, la temperatura de almacenamiento debe estar entre 20 °C y 26 °C. Se deben proteger también de la luz solar directa y de la calefacción radiante. Los especímenes que se van a transportar antes de 48 horas deben permanecer en los moldes, en ambiente húmedo, hasta que sean recibidos



Figura 7.14. Elaboración de probetas cilíndricas †

en el laboratorio. Si no son transportados dentro de las primeras 48 horas, los cilindros se deben retirar de los moldes dentro de $24 \text{ h} \pm 8 \text{ h}$, y aplicar el curado hasta que sean transportados. Retirado el molde, y antes de que pasen 30 minutos, se deben almacenar en un ambiente húmedo, o con una capa de agua libre sobre la superficie, a una temperatura de $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Cuando se trata de cilindros testigos de obra, se dejan al lado de la estructura fundida, a sus mismas condiciones de exposición.

La resistencia a la compresión se mide usando una prensa que aplica carga sobre las superficies planas del cilindro, a una velocidad especificada, hasta que ocurre la falla. La operación tarda entre 2 y 3 minutos y la carga a la que falla la probeta queda registrada en un tablero anexo a la máquina. Este valor se divide por el área de la sección transversal del cilindro, obteniéndose así el esfuerzo de rotura del concreto. El resultado se expresa en MPa, en kg/cm^2 o en lb/pul^2 (psi).

Un factor importante para la medición de la resistencia a la compresión es asegurar que la carga se aplique de manera uniforme y perpendicular a la cara del cilindro. Para ello es necesario poner sobre sus caras una capa de un material, para asegurar su paralelismo y perpendicularidad con el eje del cilindro. Esta labor se denomina "refrentado", "capping" o "cabeceo". Los materiales comúnmente usados para el refrentado son el mortero de azufre (capas adheridas) o el neopreno (capas no adheridas).

Últimamente se ha venido imponiendo el uso de cilindros de 100 mm por 200 mm, por las diferentes ventajas que presentan. Al ser más pequeños, hay ahorro de material, y se pueden usar prensas de menor capacidad de carga para la medición de probetas de altas resistencias. Además, las probetas requieren de menor espacio para almacenamiento y curado, y por la mayor facilidad para el manejo y el transporte.

También, se pueden elaborar especímenes cilíndricos que no cumplan con la relación de esbeltez 1:2. Para este caso, la norma ASTM C39 pide aplicar los factores de corrección mostrados en la Tabla 7.6, que están en función de su esbeltez, o sea, la relación entre la altura (L) y del diámetro (D) del cilindro.

Tabla 7.6. Factores de corrección por esbeltez de las probetas cilíndricas (ASTM C39)

Esbeltez L/D	Factor de corrección ^A
2,0	1,00
1,75	0,98
1,50	0,96
1,25	0,93
1,00	0,87

^A Se pueden interpolar para diferentes valores de esbeltez

También, la medida de la resistencia a la compresión del concreto se puede realizar mediante probetas de otras geometrías, como son las cúbicas o las prismáticas, que no son de uso común en Colombia. La influencia de la forma y las dimensiones de los especímenes en los resultados de las pruebas de compresión son relativas, pero se han realizado algunas correlaciones como la enseñada en la Ecuación 7.2.

$$R_c = K \cdot R \quad \text{Ecuación 7.2}$$

Donde:

R_c : resistencia del cilindro.

R : resistencia del espécimen a comparar.

K : coeficiente de correlación.

El valor del coeficiente de correlación (K) depende de muchos factores, por lo que se recomienda determinarlo mediante ensayos comparativos para cada caso específico. En la Tabla 7.7, se muestran algunos valores aproximados para probetas de diferente geometría.

Tabla 7.7. Valores aproximados de K para probetas de diferente geometría

Geometría del espécimen	Dimensiones (mm)	Valor de k
Cilíndrica	150 x 300	1,00
Cúbica	150 x 150 x 150	0,80
Prismática	150 x 150 x 450	1,05
Prismática	200 x 200 x 600	1,05

Medida de la resistencia a la tracción

Por su naturaleza, el concreto es débil a esfuerzos de tracción, razón por lo que esta propiedad generalmente no se tiene en cuenta en el diseño de estructuras corrientes. De forma adicional, otro factor que disminuye la resistencia a la tracción, tiene que ver con la contracción inducida por el fraguado o por los cambios de temperatura, pues se generan esfuerzos internos que inducen fisuras.

La resistencia a la tracción del concreto es difícil de medir por medio de ensayos directos, debido a la complejidad del montaje de las muestras. También, por las dudas que existen sobre la concentración de algunos esfuerzos secundarios generados durante la prueba, e inducidos principalmente por las mordazas que sujetan la probeta. No obstante, se estima que está entre el 8% y el 12% de la resistencia a la compresión, hallándose también con la Ecuación 7.3.

$$f_t = K * (f_c)^{0.5} \quad \text{Ecuación 7.3}$$

Donde:

f_t : resistencia a la tracción, en MPa, kgf/cm² o lbf/pul² (psi).

K: constante, que varía entre: 0,4 a 0,7, cuando f_c se expresa en MPa.

1,3 a 2,2, cuando f_c se expresa en kgf/cm².

5 a 7,5, cuando f_c se expresa en lbf/pul² (psi).

f_c : resistencia a la compresión, en MPa, kgf/cm² o lbf/pul² (psi).

En Brasil se desarrolló un método que mide indirectamente la tracción y que evita los inconvenientes anotados. El ensayo de tracción indirecta, como se ha denominado, ha sido reconocido y aceptado por muchos países del mundo, incluyendo los Estados Unidos. Colombia no es ajena a ello, y lo adoptó mediante el procedimiento descrito en la NTC 722. Consiste en someter a la compresión un cilindro convencional (150 mm de diámetro x 300 mm de alto) acostado sobre listones de apoyo (véase Figura 7.15), que se encargan de distribuir la carga, de tal manera, que la fuerza de compresión produce un esfuerzo de tracción, perpendicular al diámetro vertical, que coincide con el eje de carga.

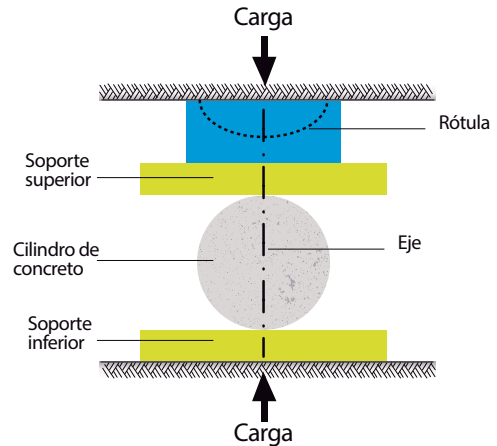


Figura 7.15. Ensayo de tracción indirecta

Si la resistencia a la compresión es por lo menos tres veces mayor a la resistencia a la tracción, como suele suceder en el concreto, se produce la falla en sentido vertical. Es decir, el cilindro se rompe en dos mitades a lo largo de su eje. La resistencia a la tracción se calcula con la Ecuación 7.4:

$$f_{ct} = (2 * P) / (\pi * L * d) \quad \text{Ecuación 7.4}$$

Donde:

f_{ct} : resistencia a la tracción indirecta, en kg/cm².

P: carga máxima aplicada en kg.

L: longitud del cilindro en cm.

d: diámetro del cilindro en cm.

Medida de la resistencia a la flexión o Módulo de Rotura (MR)

La resistencia a la flexión del concreto, más conocida como módulo de rotura (MR), es un factor importante en estructuras de concreto simple, tales como las losas de pavimento y los pisos industriales. Se evalúa sometiendo una vigueta estándar de concreto a flexión, cargada en el tercio medio.

Los detalles sobre la preparación, curado y ensayo de las viguetas se encuentran relacionados en las normas ASTM C31 y C 78, en las cuales se basan las NTC 2871 y la NTC 1377. La vigueta estándar tiene una sección transversal cuadrada de 150 mm de lado y una longitud de 500 mm, aunque puede tener otras dimensiones.

Las probetas se elaboran vaciando el concreto fresco en capas, usando moldes metálicos. Cuando se hacen con la varilla empleada para hacer las probetas de ensayo a compresión, el número de golpes es de uno por cada 14 cm² de área, de modo que, para una vigueta de

500 mm de longitud, se requiere de 60 golpes por capa, tal como se relaciona en la Tabla 7.8. Cuando se compacta con un vibrador, cada capa se compacta como se relaciona en la Tabla 7.9.

Tabla 7.8. Compactación de las viguetas con varilla

Ancho de vigueta, mm	N° capas	N° golpes/capa
100 a 200	2	1 por cada 14 cm ² del área de la superficie superior
> 200	3 o más	

Tabla 7.9. Compactación de las viguetas por vibración

Ancho vigueta mm	N° capas	N° golpes/capa
100 a 200	1	Intervalos < 150 mm a lo largo del eje central longitudinal
> 200	2 ó más	Alternas a lo largo de dos líneas

El ensayo a flexión consiste en apoyar la vigueta a 25 mm de sus extremos, dejando una luz intermedia en la que se carga en dos puntos situados en los tercios medios de los apoyos, tal como se aprecia en la Figura 7.16.

Para el caso de una vigueta estándar:

$$d = b = 150 \text{ mm}$$

L = 450 mm, descontando los 25 mm a cada lado de los apoyos; de esta forma, quedan 3 tercios de 150 mm cada uno.

El MR se calcula mediante la Ecuación 7.5, siempre y cuando la falla ocurra dentro del tercio medio de la luz libre de la vigueta.

$$MR = \frac{P \cdot L}{b \cdot d^2} \quad \text{Ecuación 7.5}$$

Donde:

MR: módulo de rotura, en kgf/cm².

P: carga de rotura, en kg.

L: luz entre apoyos extremos, en cm.

b: ancho de la viga, en cm.
d: altura de la viga, en cm.

Cuando la superficie de falla se sale del tercio medio (Figura 7.16), el MR se calcula mediante la Ecuación 7.6. Sin embargo, se debe verificar la posición de la superficie de falla en la cara inferior de la

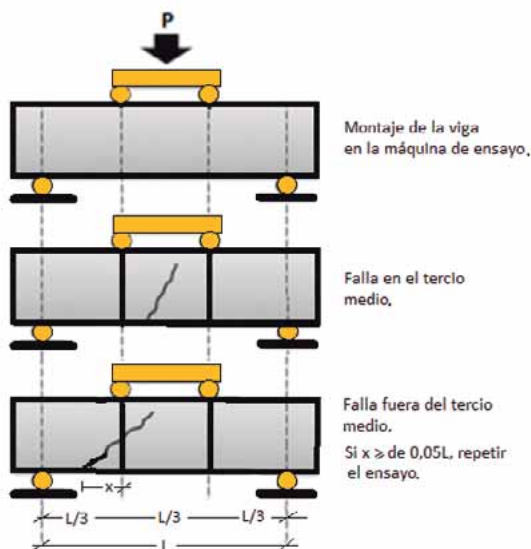


Figura 7.16. Ensayo de vigueta cargada en el tercio medio*

vigueta, que corresponde a la fibra en tracción. Esta debe estar a una distancia x , que no exceda el 5% de la luz libre de la vigueta, medida desde la línea de tercio medio más cercana. Si se supera esta distancia, el ensayo se debe repetir.

$$MR = \frac{3 \cdot P \cdot a}{b \cdot d^2} \quad \text{Ecuación 7.6}$$

Donde:

a : es la distancia entre la línea de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo del eje longitudinal de la cara inferior de la viga, en cm.

El uso de agregados de textura rugosa y de forma angular incrementa la resistencia a la flexión, razón por la cual, las normas generalmente especifican el uso de agregados triturados en la mezcla, cuando tiene como destino losas para pavimentos.

La resistencia a la flexión se puede correlacionar con la resistencia a la compresión, que puede variar entre 11% y 23% de la resistencia a la compresión. La Ecuación 7.7 proporciona valores aproximados, siendo aconsejable determinar el valor de K , para cada caso particular con los materiales disponibles, en especial, el cemento.

$$MR = K \cdot (f'_c)^{0.5} \quad \text{Ecuación 7.7}$$

Donde:

MR : módulo de rotura en MPa, kg/cm² ó lb/pul² (psi).

f'_c : resistencia a la compresión, en MPa, kg/cm² ó lb/pul² (psi).

K : constante que depende fundamentalmente de los materiales usados. Varía entre:

0,7 a 0,8, cuando f'_c se expresa en MPa.

1,99 a 2,65, cuando f'_c se expresa en kgf/cm².

7,5 a 10, cuando f'_c se expresa en lbf/pul² (psi).

Resistencia al esfuerzo cortante

Los resultados de las pruebas para la determinación directa del esfuerzo cortante, son poco confiables, pues existe una gran discrepancia entre los diferentes ensayos. Algunas investigaciones demuestran que la resistencia al corte es aproximadamente el 12% de la resistencia a la compresión, mientras que otros sostienen que puede ser mayor.

Módulo de elasticidad

En general, el módulo de elasticidad del concreto (E), se define como la relación entre el esfuerzo al que está sometido y su deformación unitaria corres-

pondiente. Representa la rigidez del material ante una carga impuesta sobre el mismo, siendo un factor importante para el cálculo de estructuras de concreto reforzado.

El módulo de elasticidad es el valor que tiene la pendiente de la gráfica esfuerzo deformación en la zona de deformación elástica.

La determinación del módulo de elasticidad estático del concreto se hace mediante el procedimiento dado en la NTC 4025, basada en la ASTM C469, y tiene como principio la aplicación de carga y la respectiva deformación unitaria generada. Para concretos de peso normal, el E varía entre 14.000 y 41.000 MPa (140.000 y 410.000 kgf/cm² o de 2 a 6 millones de lbf/pul²). Un cálculo aproximado se puede realizar por medio de la Ecuación 7.8, aunque siempre debe ser corroborada en el laboratorio, o con los valores dados por la NSR-10.

$$E = K \cdot (f'_c)^{0.5} \quad \text{Ecuación 7.8}$$

Donde:

E : módulo de Elasticidad en MPa, kg/cm² ó lb/pul² (psi).

f'_c : resistencia a la compresión, en MPa, kg/cm² ó lb/pul² (psi).

K : constante que depende de los materiales, su dosificación y del sistema de unidades en que se encuentre f'_c ; a saber:

5.000, cuando f'_c se expresa en MPa.

15.500, cuando f'_c se expresa en kgf/cm².

57.000, cuando f'_c se expresa en lbf/pul² (psi).

7.3.2 Durabilidad

*Según el ACI, la **durabilidad** del concreto es la habilidad para resistir la acción del medio ambiente, los ataques químicos y biológicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable conserva su forma, calidad y capacidad de servicio originales al estar expuesto a las condiciones del medio donde se desempeña.*

Cada clase de estructura requiere de un diseño específico de durabilidad, dependiendo de la condición de exposición y de las propiedades deseables. En general, la durabilidad que tendrá el concreto estará determinada por la calidad de los componentes en su dosificación y su interacción, así como de los métodos de colocación, compactación y curado a los que sea sometido.

La durabilidad es una propiedad tan importante como la resistencia misma. Incluso, en algunos casos, prevalece sobre las demás. Por ello, todos los diseños de mezcla contemplan las dos propiedades, predominando la más crítica. Y por supuesto, existe una gran cantidad de factores que pueden deteriorar el concreto, siendo los más importantes los que se detallarán a continuación.

Permeabilidad

Uno de los principales factores determinantes en la durabilidad es la permeabilidad, puesto que se crea la posibilidad de acceso de agentes nocivos, tanto para el concreto como para el acero de refuerzo. Tal como se estudió en los capítulos de agua y aire, la permeabilidad se asocia con la vulnerabilidad a los ciclos de hielo – deshielo, cuando el concreto se encuentra expuesto a las condiciones climáticas, pero también es el medio para que ingresen gases como el dióxido de carbono, vapores o iones que desencadenan otras reacciones perjudiciales.

Sin duda, la permeabilidad del concreto es un factor fundamental en las estructuras que retienen líquidos, convirtiéndose la estanquidad del material en uno de los factores claves de diseño. En general, se puede considerar que la permeabilidad del concreto al agua es función de los siguientes factores:

La permeabilidad de la pasta es afectada por la relación agua – cemento, el grado de hidratación del cemento y el tiempo e intensidad del curado húmedo. Es así como, con bajas relaciones agua – cemento y curados adecuados, se consiguen concretos con baja permeabilidad.

La permeabilidad de los agregados: entre más porosos sean los agregados, más conductos se pueden generar para que el agua penetre al interior del concreto.

La granulometría de los agregados: la falta de algunos tamaños en la granulometría de los agregados, hace concretos más permeables. De hecho, se diseñan concretos porosos o concretos permeables, con la reducción drástica o eliminación del agregado fino, generando un gran volumen de vacíos por donde pasa el agua.

La calidad de la pasta está muy relacionada con la rela-

ción agua – cemento, pues la formación de canales capilares dependerá de la cantidad de agua evaporable.

La compactación del concreto: un concreto deficientemente compactado contiene aire atrapado, a través del cual se generan pasos de agua.

Las siguientes prácticas pueden ayudar a obtener concretos con baja permeabilidad.

- Utilizar relaciones agua - cemento lo más bajas posibles, compatibles con una adecuada manejabilidad y compactabilidad del concreto. El empleo de aditivos reductores de agua o plastificantes es un factor clave.
- Curar la estructura adecuadamente, iniciando lo más pronto posible y prolongarlo, al menos, por 7 días.
- Colocar y compactar el concreto con métodos adecuados, acorde con el tipo de estructura y la mezcla requerida.
- Emplear agregados bien gradados, de tal forma que se obtengan concretos lo menos permeables posibles.
- El uso de algunos materiales cementantes suplementarios, ayuda a concretos más empaquetados y a la obtención de pastas de cemento con mejor calidad.
- Evitar al máximo las juntas, pero cuando sean necesarias, tratarlas y sellarlas adecuadamente.

Existen varios métodos para medir la permeabilidad del concreto, siendo el de presión uno de los más conocidos. Este procedimiento, relacionado en la NTC 4483, consiste en determinar el coeficiente de permeabilidad, k , por dos métodos, dependiendo del grado de permeabilidad del concreto. Cuando es alta, se usa flujo constante, y cuando es baja, se mide la profundidad de penetración del agua. La Tabla 7.10 muestra los va-

lores de k de referencia para los dos ensayos. Las muestras sobre las que se realizan las pruebas son cilíndricas de 150 x 300 mm, y aproximadamente de 100 mm de altura. Deben ser cortadas a una edad de 28 días. Las caras laterales se recubren con un material impermeable, normalmente epóxico, para garantizar que no haya fugas o evaporación del agua por los costados durante el ensayo.

Si en un lapso de 4 días no se ha logrado flujo constante, significa que es un concreto de baja permeabilidad, razón por la que se desmonta la probeta y se somete a la prueba de tracción indirecta, para determinar la profundidad promedio de penetración del agua. El valor de k se determina mediante las Ecuaciones 7.9 y 7.10. Cuando hay flujo constante, se determina el volumen de agua que atraviesa la probeta en un tiempo determinado.

Para flujo constante:

$$K = \frac{\varphi * L * g * Q}{P * A} \quad \text{Ecuación 7.9}$$

Donde:

K: coeficiente de permeabilidad, m/s.

φ : densidad del agua, kg/m³.

L: longitud de la muestra, m.

g: aceleración de la gravedad, m/s².

Q: caudal del agua, m/s.

P: presión del agua, N/m².

A: área transversal de la muestra, m².

Para profundidad de penetración:

$$K = (D_2 * V) / (2 * T * h) \quad \text{Ecuación 7.10}$$

Donde:

K: coeficiente de permeabilidad, m/s.

D: profundidad de penetración, m.

T: tiempo para lograr la profundidad de penetración D, s.

h: cabeza de presión de agua, m.

v: porosidad del concreto, medida a través de la ASTM C642.

Tabla 7.10. Valores de permeabilidad

Valor determinado, k	Permeabilidad		
	Baja	Media	Alta
Coeficiente de permeabilidad (m/s)	< 10 ⁻¹²	10 ⁻¹² a 10 ⁻¹⁰	> 10 ⁻¹⁰
Profundidad de penetración (mm)	< 30	30 a 60	> 60

Cambios de volumen en el concreto endurecido

El concreto en estado endurecido cambia de volumen debido, fundamentalmente, a reacciones químicas, a la acción de cargas (esfuerzos), variaciones en la temperatura ambiente y variaciones en la humedad.

Los cambios de volumen se encuentran asociados a ciclos de dilatación y contracción, que generan esfuerzos de tracción internos, y normalmente traen como consecuencia la fisuración, el agrietamiento, el incremento en la permeabilidad y el menoscabo de la estructura.

Retracción del concreto endurecido

La retracción del concreto en estado endurecido puede tener varias causas. Una de ellas es la disminución en la temperatura ambiente o por las circunstancias de trabajo. También se produce cuando el concreto se somete continuamente a ciclos de humedad (expansiéndose) y secado (contrayéndose).

En el caso de las variaciones de la temperatura ambiente, existen zonas donde durante el día pueden alcanzar temperaturas superiores a 25 °C y durante la noche por debajo de 5 °C. Estos diferenciales ocasionan contracciones importantes en las estructuras, que normalmente llevan a la generación de fisuras o agrietamiento, especialmente, a estructura con alta superficie expuesta, como es el caso de las losas.

Cuando la estructura tiene una condición de trabajo que exige calentamiento, como puede ser el caso de un horno o de una estructura adyacente a una caldera, el cambio térmico puede implicar su fisuración.

Expansión del concreto endurecido

Son varias las causas que pueden generar expansión del concreto en estado endurecido, como las altas temperaturas, la saturación de agua de la masa de concreto, los hinchamientos debidos a la reacción álcali-agregado, al ataque por sulfatos, a la congelación del agua en el interior de los poros o la expansión debida a la corrosión del acero de refuerzo.

Un caso particular, de cambio de volumen del concreto endurecido, lo constituyen las losas de concreto de pisos industriales o de pavimentos, en el que la parte inferior de la losa puede contener un grado de humedad,

o de temperatura, diferente al de la superficie. De este modo, cuando la parte inferior se dilata, la superior se contrae, trayendo como consecuencia el alabeo, tal como se muestra en la Figura 7.17. En este caso, la falla se genera cuando se carga el elemento o por efecto de su propio peso.

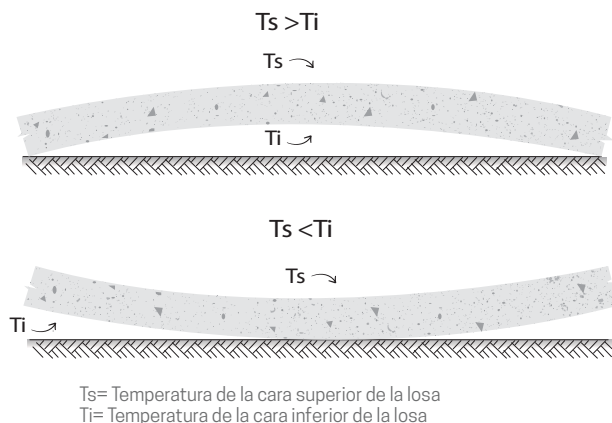


Figura 7.17. Alabeo en losas de concreto por diferencial de humedad o de temperatura entre la cara superior e inferior*

El agrietamiento debido a los efectos de cambio de humedad y de temperatura se pueden controlar o mitigar por medio de juntas, con la colocación de mallas de acero, o la adición de fibras. También es clave la producción de concretos con baja relación agua - cemento, así como una buena compactación y un adecuado curado.

Agregados reactivos

En el capítulo de agregados, se estudió cómo ciertos tipos de agregados producen una reacción química expansiva con los álcalis provenientes del cemento, o de otras fuentes internas o externas. Estas expansiones han sido responsables del agrietamiento y desintegración del concreto en muchas estructuras.

La sílice opalina y la caliza silíceas, son algunos de los tipos de agregados conocidos que reaccionan rápidamente con los álcalis del cemento. La experiencia con agregados reactivos, tanto en el campo como en el laboratorio, ha demostrado que no hay daño apreciable cuando la concentración de álcalis del cemento no sobrepasa el 0,6%. Sin embargo, esto no aplica cuando hay otras fuentes externas o internas de álcalis.

Ahora, como el daño por esta reactividad es lento, el riesgo de rotura abrupta y catastrófica es baja. No obstante, puede causar problemas de prestación de servicio y de funcionamiento de la estructura, así como empeorar otras propiedades como la permeabilidad, penetración de cloruros y el ataque por sulfatos.

Como se mencionó en el capítulo de agregados, una de las formas más efectivas para el control de la reacción álcali - sílice es el uso de los materiales cementantes suplementarios o puzolanas, tales como las cenizas, la escoria granulada de alto horno y el metacaolín.

Ataque por sulfatos

Los sulfatos de sodio, potasio y magnesio son sales que pueden estar presentes en los suelos y las aguas alcalinas, tales como el agua de mar y los suelos costeros. El ataque por sulfatos constituyen otra forma de deterioro del concreto, toda vez que reaccionan químicamente con la cal y el aluminato de calcio hidratado, en la pasta de cemento ya endurecida, para formar sulfato de calcio y sulfoaluminato de calcio. Tales reacciones generan una expansión que ocasionan esfuerzos de tensión internos, con el consecuente agrietamiento y rotura de la masa de concreto.

Una segunda causa de deterioro se presenta cuando hay un depósito de cristales de sulfato en los poros y canales capilares, debido al contacto de la estructura con agua que contiene esta sal. El deterioro ocurre cuando se presentan ciclos de humedecimiento y secado, durante los cuales los cristales aumentan de volumen, ejerciendo esfuerzos de tensión y rotura del concreto.

La primera causa se puede mitigar con el uso de cementos resistentes a los sulfatos (tipos MRS o ARS), dependiendo del grado de ataque y según lo estudiado en el capítulo de cemento. Los cementos de bajo contenido de C_3A , retrasan varios años el deterioro. Por su parte, el crecimiento de cristales se evita mediante la elaboración de concretos de baja porosidad, de muy baja permeabilidad al agua, con relaciones agua - cemento bajas y, eventualmente, con inclusión de aire.

Algunos de los procesos relacionados con los sulfatos pueden dañar al concreto, incluso sin que se produzca expansión. Por ejemplo, un concreto expuesto a sulfatos solubles puede sufrir ablandamiento de la matriz de la pasta o un aumento de su porosidad, efectos que ayudan a reducir su durabilidad.

La resistencia a los sulfatos del concreto se puede determinar mediante el método descrito en la NTC 3330, basada en la NTC 1012, que consiste en evaluar un prisma de mortero, saturado continuamente en una solución de sulfatos. Dado que este ensayo no mide las condiciones más agresivas, como son los ciclos de humedad – secado, se ha modificado para que las contemple. También se puede usar el método del U.S. Bureau of Reclamation de 1992. Así mismo, la ASTM D 516

que determina el contenido de sulfato en agua.

En la Tabla 7.11 se muestra la categoría y clase de exposición dada por la NSR – 10, respecto del ataque por sulfato; y la Tabla 7.12 relaciona los requisitos dados por la NSR – 10, para el concreto con este tipo de ataque.

Tabla 7.11. Categoría S y sus clases de exposición según NSR – 10 (7.4)

Categoría	Condición		Clase	Severidad
	Sulfatos solubles en agua (SO ₄) en el suelo, % en peso	Sulfato (SO ₄) disuelto en agua, ppm		
S Sulfato	SO ₄ < 0,10	SO ₄ < 150	S0	-
	0,1 ≤ SO ₄ < 0,2	150 ≤ SO ₄ ≤ 1500 agua marina	S1	Moderada
	0,2 ≤ SO ₄ < 2	1500 ≤ SO ₄ ≤ 10.000	S2	Severa
	SO ₄ > 2	SO ₄ > 10.000	S3	Muy severa

Está demostrado que los concretos elaborados con materiales cementantes suplementarios, en especial las adiciones con alto contenido de sílice, tienen mayor resistencia al ataque de los sulfatos, aunque para determinar su idoneidad se requieren ensayos de un año de duración. Se puede establecer que, las cenizas finas, el metacaolín, el humo de sílice y las escorias, son ade-

cuadas para proveer resistencia a los sulfatos, demostrando que su expansión es menor o igual al 0,10%, luego de un año, al ser ensayados individualmente con cemento Pórtland, de acuerdo con la norma ASTM C1012.

Tabla 7.12. Requisitos de la NSR - 10 para el concreto categoría S (7.4)

Clase	R a/mc, máxima	f'c mínima MPa	Requisitos mínimos adicionales			
			Tipos de material cementante			uso de aditivo cloruro de calcio
			ASTM C150	ASTM C595	ASTM C1157	
S0	-	17	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción
S1	0,5	28	II	IP (MS) IS(<70) (MS)	MS	Sin restricción
S2	0,45	31	V	IP (HS) IS(<70) (HS)	HS	No se permite
S3	0,45	31	V puzolanas o escoria	IP(HS) y puzolanas o escoria o IS(<70) (HS) y puzolanas o escorias	HS y puzolanas o escoria	No se permite

Ataque por ácidos

En general, el concreto es poco resistente a los ácidos. De hecho, al revisar los diferentes tipos de cemento, ninguno tiene la propiedad de resistirlos, siendo necesario recurrir a algún tipo de tratamiento cuando el concreto se encuentra expuesto a ellos.

El deterioro que los ácidos provocan en el concreto es el resultado de una reacción química entre estos compuestos y el hidróxido de calcio del cemento hidratado. Por lo general, dicha reacción da como resultado la formación de compuestos de calcio solubles en agua, que posteriormente son lixiviados por las soluciones acuosas. Aunque los ácidos oxálico y fosfórico son excepciones, puesto que las sales de calcio resultantes son insolubles en agua y no pueden ser fácilmente eliminadas de la superficie de concreto. Es de anotar que, cuando se utilizan agregados calizos o dolomíticos, también están sujetos al ataque por ácidos.

El ataque por ácidos se puede producir de varias maneras. Un caso común es el de ciertos gases presentes en la atmósfera (como CO₂ y SO₂), que en presencia de humedad reaccionan con el cemento endurecido. Otro tipo de ataque se presenta en suelos orgánicos, especialmente en aquellos que contienen turbas, dado que al oxidarse el sulfuro de hierro presente produce ácido sulfúrico.

Los ácidos orgánicos resultantes del procesamiento de productos agrícolas, como los obtenidos por fermentación (vinos, cervezas), plantas de enlatados, mataderos, molinos de pulpa de madera, aserraderos, molinos de caña de azúcar, así como las pasteurizadoras y la producción de derivados de la leche, causan erosión superficial en el concreto. Otro tipo de ácido es el producido en las heces de los animales, como las aves, particular-

mente el de las palomas, que ha sido factor de deterioro de muchas estructuras, especialmente iglesias y sitios con valor histórico.

Existen diversos tipos de tratamientos para evitar el ataque por ácidos, siendo la gran mayoría superficiales. Los más comunes y que han mostrado resultados altamente satisfactorios son, los de alquitrán de hulla, las pinturas bituminosas, las resinas epóxicas y el silicofluoruro de magnesio, entre otros. Otra forma de mejorar el concreto ante el ataque por ácidos consiste en drenarlo, antes de exponerlo, para que se forme una capa de carbonato de calcio que bloquee los poros y reduzca la permeabilidad en la superficie.

En cualquier caso, se debe evitar o minimizar el tiempo de exposición a los ácidos, impidiendo la inmersión. Aunque la producción de concretos de baja permeabilidad, con baja relación agua - cemento y el uso de humo de sílice o metacaolín, aumentan su resistencia a este medio, ningún concreto de cemento hidráulico puede soportar agua fuertemente ácida (pH ≤ 3), durante mucho tiempo.

Dado que el grado de ataque varía, dependiendo del ácido y su concentración, el tipo de tratamiento debe ser adecuadamente seleccionado. No obstante, cualquiera que sea el método empleado,

Tabla 7.13. Efecto de los agentes químicos de uso habitual sobre el concreto (7.2)

Velocidad del ataque a temperatura ambiente	Ácidos inorgánicos	Ácidos Orgánicos	Soluciones alcalinas	Soluciones salinas	Otros
Rápida	Clorhídrico Nítrico Sulfúrico	Acético Fórmico Láctico	-	Cloruro de aluminio	-
Moderada	Fosfórico	Tánico	Hidróxido de sodio ^A > 20%	Nitrato de amonio Sulfato de amonio Sulfato de sodio Sulfato de magnesio Sulfato de calcio	Bromo (gaseoso) Licor de sulfato
Lenta	Carbónico	-	Hidróxido de sodio ^A 10 a 20%	Cloruro de amonio Cloruro de magnesio Cianuro de sodio	Cloro (gaseoso) Agua de mar Agua blanda
Despreciable	-	Oxálico Tartárico	Hidróxido de sodio ^A < 10% Hipoclorito de sodio Hidróxido de amonio	Cloruro de calcio Cloruro de sodio Nitrato de zinc Cromato de sodio	Amoníaco (líquido)

^A El efecto del hidróxido de potasio es similar al del hidróxido de sodio

es importante que la capa protectora aplicada permanezca, siendo necesarias inspecciones y mantenimientos periódicos. En la Tabla 7.13, extractada del ACI 201.2R-01, se enseña el efecto de algunos agentes químicos de uso corriente sobre el concreto.

Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión se define como la habilidad que tiene el concreto para evitar la pérdida de material por efecto del rozamiento en seco. La resistencia del concreto al desgaste por abrasión es importante en algunos tipos de estructuras, como pisos y pavimentos, donde las llantas, la arena y otros materiales pueden causar desprendimiento de partículas de los elementos componentes del concreto.

Generalmente, un concreto sometido a una exposición de desgaste se ve afectado por la remoción del mortero. El uso de agregados resistentes, poco porosos y de gran tamaño; un buen curado, un acabado apto de alisado con llana metálica (que cierra poros), y una baja relación agua - cemento, ayudan a la obtención de concretos con buena resistencia al desgaste por abrasión.

Cuando una estructura requiera de alta resistencia al desgaste, como es el caso de los pisos industriales, se hace necesario el empleo de recubrimientos especiales como endurecedores en superficie con agregados metálicos o minerales (silíceos). También existen en el mercado endurecedores líquidos a base de polímeros o de litio, que penetran el concreto endurecido, densificándolo y evitando la penetración de líquidos. Es aconsejable probar estos materiales en muestras a escala antes de su uso definitivo, y determinar su comportamiento.

La resistencia a la abrasión del concreto se puede medir a través de diferentes métodos, como el sometimiento a la rotación de esferas de acero, ruedas de afilar o discos bajo presión sobre la superficie (ASTM C779); o el descrito en la ASTM C418, que mide la pérdida de peso que experimenta una muestra de concreto bajo la acción de un disco abrasivo luego de un determinado ciclo.

Por su parte, la norma ASTM C1138 mide la resistencia a la erosión, que se define como la habilidad que tiene el concreto para evitar la pérdida de material por efecto del paso del agua y los sedimentos. Algunas estructuras sometidas a abrasión son los vertederos de presas, canales, columnas de puentes en contacto con la corriente, muelles, obras de abrigo de los muelles (rompe-olas); entre otras.

Resistencia al fuego

En términos generales, el concreto tiene buenas propiedades de resistencia al fuego, siendo este uno de sus méritos como material estructural. La resistencia a los daños producidos por el fuego se incrementa en la medida que aumenta el espesor de la estructura.

Por una parte, cuando el concreto está sujeto al fuego y se introducen altas temperaturas, las capas superficiales calientes tienden a separarse y descascararse desde la parte de la estructura más fría. En consecuencia, se produce la formación de grietas en las juntas, en las partes de concreto mal compactadas y en los planos de las varillas de refuerzo. Por otra parte, la pérdida de resistencia del concreto comienza aproximadamente a los 300° C. Finalmente, una vez el refuerzo queda al descubierto, se calienta rápidamente con la consecuente pérdida de resistencia. El acero común pierde aproximadamente el 50% de su resistencia a los 600° C, mientras que el acero pretensado sufre la misma pérdida, pero a 400° C.

La resistencia del concreto al ataque por el fuego depende principalmente el tipo de agregados, el contenido de humedad, el tipo de cemento, y el espesor del elemento de concreto.

Los agregados artificiales de mejor resistencia al ataque por el fuego son los livianos, debido a que la mayoría son elaborados mediante procesos que involucran altas temperaturas. De los naturales se destacan los de origen volcánico, cuya formación se realiza por la solidificación del magma, y de los artificiales la arcilla termo-expandida.

El contenido de humedad del concreto también influye en la velocidad de descascaramiento por fuego. Algunos análisis de estructuras expuestas muestran que, a mayor contenido de humedad del elemento, más rápido es el proceso de desprendimiento de la parte superficial del concreto.

Es posible la elaboración de concretos refractarios mediante el uso de un cemento especial, con alto contenido de alúmina, que produce concretos altamente resistentes al fuego, pero con el inconveniente de no poderse usar con fines estructurales.

Carbonatación

La carbonatación del concreto es un proceso en el que el dióxido de carbono (CO_2) penetra en el concreto y reacciona, en presencia de humedad, con el hidróxido de calcio o Portlandita, formando carbonato de calcio. El CO_2 puede provenir de la atmósfera (automotores y fábricas que emplean combustibles fósiles como carbón o petróleo) o del agua que transporta CO_2 en disolución; también el CO_2 absorbido por la lluvia y la putrefacción de la vegetación (humus), que ingresan al agua subterránea en forma de ácido carbónico.

El concreto es un material bastante alcalino, cuyo pH alcanza valores entre 12 y 13. Esta propiedad es muy importante para el concreto reforzado, toda vez que el recubrimiento del concreto sobre el acero le sirve como medio de protección contra la corrosión. Esta defensa se logra porque la superficie del acero, embebida en el concreto, queda pasivada por ese ambiente alcalino. Aunque la carbonatación del concreto endurecido no le hace daño, esta cobra importancia cuando la parte carbonatada disminuye el pH a valores cercanos a 9. Si el frente de carbonatación avanza hasta alcanzar el acero de refuerzo, la capa que lo protege pasivante desaparece y comienza el proceso de corrosión, originando el fisuramiento de la capa superficial del concreto, por el aumento de volumen del óxido generado alrededor del acero de refuerzo y el consecuente descascaramiento.

El proceso de carbonatación en el concreto depende, en gran medida, de la humedad presente en el concreto, de modo tal que el fenómeno tendrá lugar si la humedad se encuentra entre un 20% y un 80%. No obstante, el proceso de corrosión del acero se acelera cuando la humedad del concreto está entre 50% y 75%. Si la humedad es mayor al 75%, la humedad presente en los poros restringe la penetración de CO_2 . Esto significa que en concretos totalmente saturados o totalmente secos, no se producirá carbonatación.

El grado de permeabilidad del concreto, juega papel importante en la velocidad de la carbonatación, pues si es totalmente impermeable al agua, no hay lugar al ingreso de humedad ni de CO_2 , por lo que no se producirán los carbonatos. Esto significa que, para zonas con alta contaminación ambiental (alto volumen vehicular como puentes, pavimentos de concreto, parqueaderos o zonas industriales), una buena protección al concreto contra la carbonatación se logra con concretos de baja relación agua - cemento, buena compactación, el uso de adiciones, un buen curado, el uso de inclusores de aire, o una protección exterior al concreto; es decir, siguiendo las prácticas para producir concretos de baja permeabilidad.

La determinación de la profundidad de carbonatación

normalmente se hace tomando un núcleo de la estructura, preferiblemente cerca de un borde, donde se sospecha que el concreto se encuentra carbonatado. Se somete a la prueba de tracción indirecta. Se rocía sobre las caras fracturada una solución de fenoltaleína al 1% o 2% en alcohol, tal como se aprecia en la Figura 7.18. Las áreas carbonatadas del concreto, que tienen un pH menor a 8,2 no cambiarán de color, mientras que las áreas con pH mayor, tomarán un color púrpura brillante. Esta es la manera más rápida y sencilla de medir la profundidad de carbonatación.



Figura 7.18. Medición de la carbonatación del concreto †

Disolución del agua

El agua que se encuentra en contacto con el concreto endurecido, puede causar varios efectos. Desde el punto de vista de sustancias disueltas en el agua, se distinguen dos tipos:

- Las aguas duras, son aquellas que tienen sustancias disueltas.
- Las aguas blandas o puras, aquellas que no tienen sustancias disueltas.

Las aguas muy puras son agresivas para el concreto porque facilitan la disolución del hidróxido de calcio o cal, produciendo su lixiviación. Los concretos elaborados adiciones cementantes son menos susceptibles a estos ataques, debido a que, como se explicó en el Capítulo de Cemento, el hidróxido de calcio se combina químicamente con los materiales cementantes suplementarios.

Por su parte, en lo que corresponde a ciertas aguas duras, como las que contienen sales de magnesio (sulfato o

cloruro), se intercambian los cationes de calcio por cationes de magnesio, dando lugar a sales solubles en agua y, por tanto, susceptibles de lixiviación. En este caso también se recomienda usar cementos con adiciones que fijan la cal, evitando tales inconvenientes.

Corrosión de las armaduras - ataque por cloruros

El proceso de oxidación del acero se produce cuando la capa pasivante que lo protege se pierde. Como se mencionó, el concreto alcalino protege al acero embebido de la entrada de agentes que pueden dar inicio a la corrosión, como CO₂, cloruros, oxígeno y agua, entre otros.

Cuando el acero de refuerzo se oxida, aumenta su tamaño entre 2,2 y 4 veces el volumen original, ocasionando tensiones internas que dan origen a grietas y descascaramientos de la capa de recubrimiento. Otro problema que se presenta es la pérdida de diámetro efectivo del acero, llegando, a extremos críticos como la desaparición de la varilla y la consabida disminución de resistencia. Ambos problemas traen consecuencias estructurales graves al elemento.

La corrosión se evita produciendo concretos de baja permeabilidad, logrados con bajas relaciones agua - cemento con el uso de adiciones, bien compactados, adecuadamente curados y usando recubrimientos de concreto suficientes.

El ion cloruro es un elemento altamente corrosivo. Está presente en aguas de mar, suelos o aguas freáticas, en plantas de tratamiento de aguas y piscinas. Para que se inicie un proceso de corrosión del acero embebido en un concreto con un pH de 12,5, se requieren entre 7.000 y 8.000 partes por millón (ppm) de cloruros. Pero si el pH es menor que 10, bastarán tan solo cerca de 100 ppm, para iniciar el proceso de corrosión.

Uno de los procedimientos usados para la determinación rápida de la habilidad del concreto a la resistencia y a la penetración del ion cloruro, lo da la norma ASTM C1202. Consiste en monitorear durante 6 horas la corriente eléctrica que pasa través de una muestra de concreto de 50 mm de longitud y 100 mm de diámetro, manteniendo una diferencia del potencial eléctrico de 60 V en corriente directa, a través de los extremos de la muestra (Figura 7.19). Durante la prueba, uno de los extremos se encuentra sumergido en la solución de cloruro de sodio, y el otro en una solución de hidróxido de sodio. Se mide

la carga total que pasa a través del espécimen, en Culombios (Coulombs), equivalente a la resistencia del espécimen ante el ion de cloruro, de acuerdo con los valores mostrados en la Tabla 7.14.

Tabla 7.14. Relación Culombios-Penetración del ion cloruro

Culombios	Penetración del ion cloruro
>4.000	Alta
2.000 a 4.000	Moderada
1.000 a 2.000	Baja
100 a 1.000	Muy baja
<100	Despreciable

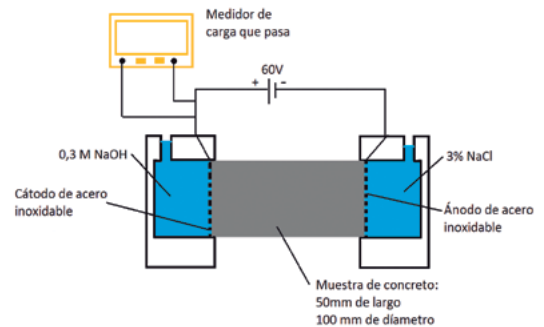


Figura 7.19. Ensayo para la determinación de la resistencia a la penetración de cloruros †

Cuando se prevé ataque por cloruros, el uso en el concreto de materiales cementantes suplementarios ricos en aluminio, como el metacaolín, resulta altamente efectiva; en virtud de que el ion cloro se combina químicamente con el aluminio, dando lugar a una reacción que forma la denominada sal de Friedel, evitando la penetración del ion cloruro hasta el acero.

Algunos grados de ataque al concreto producido por ciertos elementos, se relacionan en la Tabla 7.15, denominada Tabla de Bonzel.

Tabla 7.15. Tabla de Bonzel (7.10)

Elemento	Tipo de ataque		
	Débil	Fuerte	Muy fuerte
pH	6,5 a 5,5	5,5 a 4,5	4,5
CO ₂ agresivo para la cal, mg/litro	15 a 30	30 a 60	60
NH ₄ ⁺ mg/litro	15 a 30	30 a 60	60
Mg ⁺⁺ mg/litro	100 a 300	300 a 1.500	1.500
SO ₄ ²⁻ mg/litro	200 a 600	600 a 2.400	2.400

Ataque por agentes descongelantes

El ataque por ciclos de hielo – deshielo se estudió en el Capítulo de Aire. Como se vio, es uno de los factores más agresivos al concreto expuesto, al medio ambiente en las zonas que sufren este fenómeno, como son los países con estaciones, específicamente, donde el agua hiela.

Una de las prácticas más comunes para retirar el hielo de los pavimentos de concreto, es con el uso de sales (cloruro de sodio, cloruro de calcio, o ambas), que actúan como material descongelante. No obstante, éstos propician la desintegración superficial, generando picaduras y descascamientos. Además, cuando alcanzan el acero, aceleran su corrosión.

El mecanismo mediante el cual los agentes descongelantes deterioran el concreto es similar al presentado durante las heladas, toda vez que involucran el desarrollo de presiones, principalmente en la pasta, durante el congelamiento. Sin embargo, este mecanismo es más severo si se emplean, como medio de protección, las mismas recomendaciones dadas en el capítulo de aire.

7.3.3 Densidad

La densidad del concreto se define como la masa por unidad de volumen. Esta propiedad depende de la masa y de la proporción en que participa cada uno de los diferentes elementos constitutivos del concreto. Para concretos de densidad normal su valor puede variar entre 2.000 kg/m³ y 2.600 kg/m³. La densidad es importante en el cálculo estructural, toda vez que con ella se calcula el peso muerto de la estructura.

La densidad del concreto depende también de si está en estado fresco o endurecido, siendo mayor la primera pues en el concreto endurecido parte del agua de mezclado se evapora. La diferencia entre los dos estados es de aproximadamente 7%.

Los concretos livianos se obtienen con agregados lige-

ros, como piedra pómez o los obtenidos industrialmente por termo expansión (arcillas expandidas generalmente). También se emplean, particularmente, como aislamiento térmico o acústico. Su densidad de equilibrio se encuentra entre 1.440 y 1.840 kg/m³. Se verán en detalle en el Capítulo 10.

Los concretos pesados se obtienen mediante el uso de agregados pesados, como la barita, la limadura de hierro, o el acero. Se utilizan principalmente cuando se desea protección contra radiaciones. Su densidad es mayor que 2600 kg/m³.

7.3.4 Otras propiedades

Dentro de las muchas otras características que posee el concreto, es oportuno mencionar las propiedades térmicas, eléctricas, acústicas, la apariencia, las propiedades elásticas y las plásticas. Tales propiedades pueden, en ciertas obras, constituirse en las referentes del proyecto, por encima, incluso, de la resistencia y durabilidad.

7.4 Referencias y bibliografía recomendada

- 7.1. ABRAMS, DUFF A. Design of Concrete Mixtures. Research Laboratory Lewis Institute, Structural Materials Bulletin No.1, 1918.
- 7.2. ACI 201. Durabilidad del Concreto. IMCYC, México, 2001.
- 7.3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Concrete and Mineral Aggregates Part. 4, Easton, ASTM, 2015.
- 7.4. ASOCIACIÓN DE INGENIERÍA SÍSMICA. Reglamento de Construcciones Sismo Resistente. Bogotá, AIS, 2011.
- 7.5. CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. Concrete Technology and Construction, Aggregate Testing, London, C&CA, 1984.
- 7.6. CONCRETE MANUAL. Bureau of Reclamation, Denver, Col., 1979.

7.7. INSTITUTO COMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas Técnicas para la Construcción, Bogotá, ICONTEC, Colombia.

7.8. INSTITUTO CHILENO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN. Compendio de tecnología del hormigón. Santiago de Chile. I.CH.C.H. 1988.

7.9. INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO - SOLINGRAL. Capítulo de Dosificación de Mezclas de Concreto, ICPC, Medellín, 1979.

7.10. KÖLZOW, H. Protección Química de la Construcción. Madrid. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento. 1971.

7.11. L´HERMITE, R. A Pie de Obra. Madrid, Editorial Tecnos, 1971.

7.12. MATAALLANA R. Fundamentos de Concreto Aplicados a la Construcción. Bogotá, ICPC, 2007.

7.13. MEHTA, K. Concrete – Structure, Properties and Materials. Prentice Hall, New Jersey, 1986.

7.14. NEVILLE, A. M. Tecnología del Concreto. IMCYC, México, 1999.

7.15. PORRERO J, RAMOS C, GRASES J. Manual del Concreto Fresco. Asociación Venezolana de Sistemas de Paredes Estructurales, Caracas, 1979.

7.16. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Illinois, PCA, 2004.


7.17. SANDINO ALEJANDRO. Hormigón. Central de Mezclas S.A., 1980.

7.18. SANDINO, A. Materiales para Estructuras. Escuela Colombiana de Ingeniería, Bogotá, 1981.

7.19. TROXELL, D. Composition and Properties of Concrete, N.Y., McGraw-Hill, 1968.

8

Diseño y dosificación de mezclas normales



Con el diseño de la mezcla se determinan sus características para la mezcla. Con el proporcionamiento se determinan las cantidades de los componentes para lograr las características deseadas.

El diseño de mezcla es el proceso para determinar las características requeridas del concreto. El capítulo anterior se dedicó al estudio de las propiedades, considerando dos estados fundamentales: el fresco y el endurecido, que son determinantes en el diseño de la mezcla.

La dosificación o proporcionamiento de una mezcla es el proceso para determinar las cantidades de los componentes del concreto, empleando materiales locales, a fin de lograr las características especificadas. Las principales exigencias del concreto son: la manejabilidad adecuada en estado fresco; la resistencia, durabilidad, densidad y apariencia en estado endurecido; y la economía.

Son muchos los métodos de diseño de mezcla desarrollados, siendo, tal vez, el del Comité ACI 211.1 del Instituto Americano del Concreto, uno de los más conocidos y ampliamente usados regionalmente. Este método describe dos procedimientos para seleccionar y ajustar proporciones para concreto de densidad normal, con y sin aditivos y materiales cementantes suplementarios. Uno de los procedimientos está basado en la densidad estimada del concreto por unidad de volumen. El otro se fundamenta en el cálculo del volumen absoluto ocupado por los ingredientes del concreto, tomando como base la suma del volumen absoluto de los materiales cementantes, los agregados, el agua y el aire.

El método del ACI 211.1 también incluye, en uno de sus apéndices, la dosificación para concreto pesado para propósitos especiales, como la protección contra radiaciones y estructuras de contrapeso de puentes, por

ejemplo, usando el procedimiento de volumen absoluto. En otro apéndice, se suministra la información para el proporcionamiento del concreto masivo, también mediante el método del volumen absoluto, que es el de aceptación general.

Por su parte, el Comité ACI 211.2 considera dos métodos para proporcionar concreto estructural con agregados livianos: el método del peso, que usa un factor de gravedad específica, para estimar el peso por unidad de volumen del concreto fresco; y el método de la relación contenido de cemento – resistencia. Como se ha mencionado, el tema de los concretos con agregado liviano se trata en el Capítulo 10.

La gran mayoría de concretos se diseñan para estructuras con una densidad normal, por esta razón el presente capítulo se toma como base el procedimiento del ACI 211.1, aplicando el método del volumen absoluto, que es uno de los más aceptados y utilizados. El método ACI se ha desarrollado para agregados que tienen una buena gradación. No obstante, en muchas ocasiones los agregados no cuentan con gradaciones adecuadas, caso en el cual se sugiere emplear como alternativa el método, de origen británico, de la Road Note Laboratory – RNL,

que consiste en un método gráfico para optimizar la granulometría de la arena y la grava para producir la mezcla requerida. Para cada uno de los métodos sugeridos se desarrolla un ejemplo.

Adicional a los métodos relacionados, se explican los criterios usados en la NSR - 10 para la dosificación de mezclas de concreto, que han sido adoptados del ACI 318, y que incluye el concepto de la resistencia promedio requerida (f'_{cr}), empleando la desviación estándar, se dispongan o no de datos estadísticos.

En este capítulo se emplean los conceptos estudiados en las secciones precedentes, usando tablas, ábacos y fórmulas extraídas de los métodos mencionados, aunque algunas han sido desarrolladas mediante investigaciones locales. También se aplican los criterios definidos por la NSR - 10, establecidos a lo largo de la norma.

Las cantidades obtenidas por cualquier método de dosificación, constituyen tan solo una primera aproximación, debiendo ser comprobadas y ajustadas mediante mezclas de laboratorio, usando los materiales que serán empleados en la obra.

8.1 Elección de las propiedades de la mezcla y datos requeridos para el diseño

8.1.1 Selección de las propiedades de la mezcla

Antes de proceder a la dosificación, es necesario seleccionar las características requeridas del concreto, teniendo en cuenta el uso de las condiciones de exposición, geometría del elemento (tamaño y forma), y propiedades tales como la resistencia a la compresión de diseño (f'_{cr}), acabado, resistencia a la abrasión, entre otras exigidas.

8.1.2 Datos requeridos para el diseño

Es importante conocer:

- Los datos de la obra o estructura.
- Las condiciones de transporte y colocación.
- Las propiedades de los materiales disponibles para preparar la mezcla.

Datos de la obra

Se requiere saber:

- Máxima relación agua/cemento.
- Manejabilidad (Asentamiento) recomendada.
- Mínimo contenido de cemento.
- Dimensión mínima del elemento que se va a construir.
- Espaciamiento del acero de refuerzo.

- Condiciones a que estará expuesta la estructura.
- Resistencia a la compresión de diseño.
- Densidad, en caso que sea especificada.

Normalmente estos datos se obtienen de los planos y de las especificaciones de la obra.

Datos de los materiales

De las propiedades de los materiales que se van a utilizar, se debe conocer:

- La granulometría de los agregados.
- El MF de la arena.
- El TM de la grava.
- TMN de la grava.
- La densidad aparente de la grava y de la arena.
- La absorción de la grava y de la arena.
- La masa unitaria compacta de la grava.
- La humedad de los agregados, inmediatamente antes de hacer las mezclas.
- La densidad del cemento.

Datos del tipo de mezcladora, transporte y colocación

- Tipo de mezcladora a emplear.
- Tipo de transporte (mixer, volqueta, carretilla, banda transportadora, entre otras).
- Método de colocación (bomba, sistema Tremie, canaletas, torre grúa; por citar algunas).

8.2 Métodos sugeridos de dosificación

Como se mencionó, en este capítulo se estudiarán tres métodos, uno basado en el ACI 211.1, para mezclas de concreto normal, otro basado en la notas de laboratorio de caminos - RNL, y el tercero usando los requisitos de la NSR - 10 (ACI 318).

Para optimizar las proporciones de los constituyentes de la mezcla, cualquiera que sea el método usado, se logra mediante el sistema iterativo de ajuste y reajuste. El sistema consiste en preparar una primera mezcla de prueba, con las proporciones iniciales calculadas por el método empleado. A la mezcla de prueba se le efectúa el ensayo de asentamiento y si su valor es diferente al recomendado, se reajustan las cantidades.

Cuando se logra el asentamiento requerido con las proporciones reajustadas, se elaboran especímenes para determinar su resistencia a la compresión, se compara con la resistencia de diseño y, si son diferentes, se vuelven a ajustar las cantidades. Una vez reajustadas las cantidades, se elabora otra mezcla, que debe cumplir con el asentamiento, la resistencia y demás requisitos. Si por algún motivo no se cumple cualquiera, debido a particularidades de los materiales, y que no se detectan con los ensayos corrientes, se pueden hacer ajustes similares a los indicados, hasta lograr los resultados deseados.

8.2.1 Método basado en el ACI 211.1

Este método consiste en seguir de manera ordenada una secuencia de pasos para determinar la cantidad de los materiales básicos (cemento, aire, agua, grava y arena), en masa y en volumen absolutos, para un metro cúbico (1 m³) de concreto. En el procedimiento seguido, no se considera la dosificación de materiales cementantes suplementarios, pues estos se consideran sumados con el cemento, y conforman el material cementante. Los pasos son:

- **Paso 1:** elección de la manejabilidad de la mezcla (asentamiento).
- **Paso 2:** elección del TMN del agregado grueso.
- **Paso 3:** determinación del contenido de aire.
- **Paso 4:** determinación de la cantidad de agua de mezcla.
- **Paso 5:** elección de la relación (a/c) o agua/material cementante (a/mc).
- **Paso 6:** cálculo del contenido de cemento.
- **Paso 7:** estimación del contenido de agregado grueso (grava).
- **Paso 8:** cálculo del contenido de agregado fino (arena).
- **Paso 9:** ajustes por humedad de los agregados.
- **Paso 10:** ajustes a las mezclas de prueba.

Paso 1: elección de la manejabilidad de la mezcla

El concreto se debe producir para que tenga trabajabilidad, consistencia y plasticidad, acorde a las condiciones de la obra. El grado de manejabilidad apropiado de una mezcla depende de varios factores como: tamaño y forma de la estructura, tipo, disposición, tamaño y cantidad del acero de refuerzo, los métodos de transporte, colocación y compactación. De modo que un elemento muy reforzado o de difícil acceso, requiere de mayor grado de manejabilidad, que uno con poco refuerzo.

El ACI emplea el ensayo de asentamiento como parámetro de medida de la trabajabilidad, y sugiere los valores

mostrados en la Tabla 8.1, en el evento de no estar especificado. Tales valores se usan cuando el método de compactación utilizado sea la vibración. Cuando se emplee otro método de compactación diferente, como el varillado o el picado, estos deben aumentarse en 2,5 cm. Si se requieren asentamientos mayores, se puede recurrir al uso de un plastificante.

Cuando el asentamiento no se encuentra relacionado en la tabla, se puede adoptar un valor apropiado para el tipo de estructura. En cualquier caso, se recomienda la adopción de la menor consistencia posible, que permita realizar los procesos de colocación, compactación y terminado de forma eficiente.

Tabla 8.1. Valores de asentamiento recomendados para diferentes tipos de estructuras (8.2)

Tipo de estructura	Asentamiento, mm	
	Mínimo	Máximo ^A
Zapatas y muros de cimentación reforzados	25	75
Zapatas, cajones y muros de subestructuras sin refuerzo	25	75
Vigas y muros reforzados	25	100
Columnas de edificios	25	100
Pavimentos y losas	25	75
Concreto masivo	25	75

^A Se puede aumentar 25 mm para métodos de consolidación manual, tal como el varillado.

Paso 2: elección del TMN del agregado grueso

Para asegurar que el refuerzo quede adecuadamente embebido y para minimizar los hormigueros, la NSR – 10, limita el TMN, por las dimensiones de la estructura (Figura 8.1). El TMN en ningún caso debe exceder de:

- Un quinto (1/5) de la menor separación entre los lados de la formaleta.
- Un tercio (1/3) de la altura de la losa.
- Ni de las tres cuartas partes (3/4) del espaciamiento mínimo libre entre las barras o alambres individuales de refuerzo, paquetes de barras, tendones individuales de refuerzo, paquetes de tendones de varillas, o de ductos.

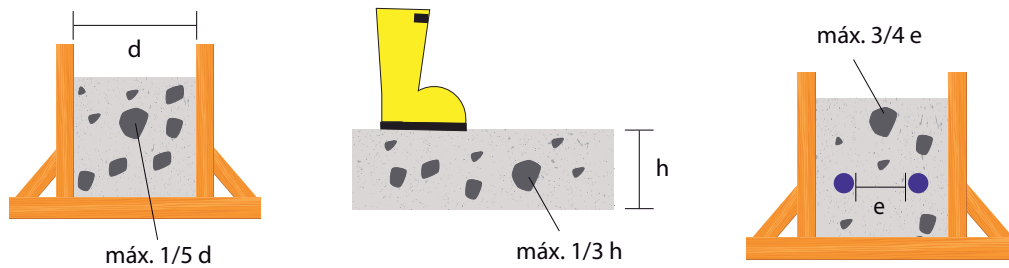


Figura 8.1. Restricciones al TMN por las dimensiones del elemento, según NSR - 10*

La NSR - 10 aclara que tales limitaciones se pueden omitir, si a juicio del profesional facultado para diseñar la trabajabilidad y los métodos de compactación, permiten que el concreto se pueda colocar sin la formación de hormigueros, vacíos o segregación de la mezcla.

También es recomendable limitar el TMN para que no supere los tres cuartos (3/4) del espacio libre entre el refuerzo y la formaleta.

Los estudios y la práctica demuestran que agregados con una buena granulometría y con mayor TMN, tienden a formar masas más compactas y con menos vacíos que los de menor TMN; En consecuencia, si se aumenta el TMN de los agregados en una mezcla de concreto, para un asentamiento dado, tanto el contenido de agua como de cemento se disminuyen, con lo que se consiguen concretos más económicos y con menor retracción por fraguado. Sin embargo, cuando se desea obtener un concreto de alta resistencia, se debe reducir el TMN de los agregados, debido a que estos producen mayores resistencias con una determinada relación agua/cemento.

En ocasiones, la elección del TMN puede estar limitada por factores diferentes a la dimensión mínima del elemento que se construirá, como son, el equipo disponible para mezclar o el método requerido de colocación del concreto. Las características del tipo de mezcladora disponible son importantes, y algunas, como las de descarga libre, están diseñadas para que trabajen de forma efectiva con partículas de grava de tamaño máximo hasta de 150 mm (6"). Hay otras, como las de mezcla de acción forzada, que su diseño generalmente permite mezclar solo concretos con agregado grueso, cuyo TMN no exceda de 37,5 mm (1 1/2").

Con respecto al método de colocación, el uso de

bombas, bandas transportadoras o cualquier otro tipo especial de colocación, puede generar limitaciones en el TMN. Cuando se trata de concreto bombeado, el ACI 304 recomienda que no sea mayor al 40% del diámetro de la tubería, para los agregados con forma redondeada; por su parte, cuando se trata de partículas angulares, la limitación se hace a la tercera parte del diámetro. Esto se debe a que agregados de forma redondeada y textura lisa, tienen un mejor desplazamiento durante el proceso de bombeo. Teniendo en cuenta que los diámetros comerciales de las tuberías más usadas para bombear concreto son de 100 mm y 150 mm, se recomienda el uso de agregados cuyo TMN se halle entre 19 mm (3/4") y 37,5 mm (1 1/2").

Cuando se usa banda transportadora, el TMN se restringe por el ángulo de inclinación de la banda. Entre más pequeño sea el ángulo de inclinación, se recomienda el uso de partículas de agregado con TMN mayor, y viceversa, evitando que las partículas más grandes rueden por acción de la gravedad y que se produzca segregación de la mezcla. El ACI 304 recomienda que el transporte de la mezcla por banda transportadora se realice con agregado grueso de TMN hasta de 100 mm (4").

Paso 3: determinación del contenido de aire

Los efectos del aire incluido y del aire atrapado naturalmente en mezclas de concreto fueron estudiados en el capítulo 5, de donde se extraen las Tabla 8.2 y Tabla 8.3, que se emplean para determinar el contenido aproximado de aire atrapado y total en la mezcla, respectivamente.

Tabla 8.2. Contenido aproximado de aire en el concreto para varios grados de exposición (8.10)

TMN		% Promedio aproximado de aire atrapado
Pulgadas	mm	
3/8	9,5	2,7
1/2	12,5	2,5
3/4	19	2,0
1	25	1,7
1 1/2	38	1,5
2	50	1,0
3	75	0,3
6	150	0,2

Tabla 8.3. Contenido total de aire para concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo (8.4)

TMN		Contenido total de aire en, %	
Pulgadas	mm	Exposición clases F2 y F3	Exposición clase F1
3/8	9,5	7,5	6,0
1/2	12,5	7,0	5,5
3/4	19	6,0	5,0
1	25	6,0	4,5
1 1/2	38	5,5	4,5
2	50	5,0	4,0
3	75	4,5	3,5

Paso 4: determinación de la cantidad de agua de mezcla (a)

La cantidad de agua requerida para producir un asentamiento dado depende de varios factores como: el TMN del agregado, la forma y textura de las partículas de agregado, la gradación de los agregados, la cantidad de aire incluido, y los aditivos reductores de agua. Dada la dificultad de tener en cuenta al tiempo todos los parámetros, su estimación no es sencilla. No obstante, se

han desarrollado estudios que tienen en cuenta algunos de los factores más importantes y que ofrecen una buena aproximación. En este documento se sugieren los criterios del profesor Alejandro Sandino y del ACI.

Las curvas desarrolladas por el profesor Alejandro Sandino (Figura 8.2), se encuentran en función del TMN, del asentamiento y la textura de las partículas de agregado. Para hallar el contenido de agua, se accede a la gráfica por el eje de las ordenadas, que representan el asentamiento (obtenido en el paso 1), se encuentra con la curva del TMN, dependiendo de si son agregados de textura lisa (línea continua) o textura angular (línea punteada), y se baja perpendicularmente hasta cortar el eje de las abscisas, que indica la cantidad de agua requerida, en kg/m³ de concreto.

Por su parte, el ACI 211.1 recomienda el empleo de la Tabla 8.4, que tiene en cuenta parámetros como el asentamiento, el TMN y el contenido de aire. El valor hallado por cualquiera de los dos criterios asume que las partículas están en la condición saturada y superficialmente secas (SSS), por lo que es necesario sumarle el agua de absorción o restarle el agua libre, según sea el caso, antes de introducirlos en la mezcladora. En esto consiste el ajuste por humedad de los agregados del paso 8.

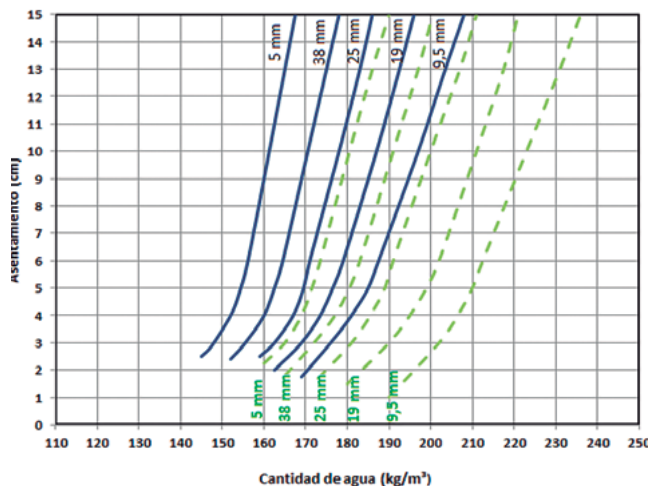


Figura 8.2. Requerimientos de agua de mezclado (8.10)

Tabla 8.4. Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire, para diferentes asentamientos y TMN del agregado (8.2)

Contenido de aire	Asentamiento (cm)	Agua, en kg/m ³ de concreto para los TMN del agregado indicados ^A , mm							
		9,5	12,5	19	25	37,5	50 ^B	75 ^B	150 ^B
Concreto sin aire incluido	3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
	8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
	15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	-
	Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin aire incluido, %	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Concreto con aire incluido	3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
	8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
	15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	-
	Promedio recomendable de contenido total de aire, %	8	7	6	5	4,5	4	3,5	3

^A Las cantidades de agua de mezclado mostradas pueden utilizarse en los cálculos de los factores de relación agua - cemento para mezclas de prueba. Son las máximas para agregados gruesos angulares, razonablemente bien gradados dentro de los límites de las especificaciones aceptadas.

^B Los valores de asentamiento para un concreto que contenga un agregado mayor de 40 mm, están basados en ensayos de asentamiento, efectuados después de remover las partículas mayores de 40 mm, por medio de tamizado de la mezcla en estado fresco.

Paso 5: elección de la relación agua/cemento (a/c) o agua/material cementante (a/mc)

Tal como se explicó en el Capítulo 7, la relación a/mc, es simplemente la masa del agua dividida por la masa del material cementante (cemento Pórtland, cemento adicionado, ceniza volante, escoria, humo de sílice, puzolanas, metacaolín).

La relación a/c o a/mc requerida, se determina básicamente por requisitos de resistencia, durabilidad, impermeabilidad y acabado, considerándose uno de los factores de diseño más importantes. Es por ello, que muchas especificaciones establecen la máxima relación a/mc, para lo cual se debe escoger el menor valor necesario, para que cumpla simultáneamente los requisitos de resistencia y durabilidad.

Desde el punto de vista resistencia, dado que para diferentes tipos y marcas de cemento y de agregados, se desarrollan distintas resistencias con una misma relación a/mc, la selección de este factor se debe realizar desarrollando gráficas específicas, elaboradas con mezclas de prueba o datos de campo adecuados, que empleen los materiales de la obra, en las que se relacione la resistencia a la compresión y la relación a/mc. Cuando no se disponga de tales datos, se han desarrollado gráficas, como la mostrada en la Figura 8.3, que permiten estimar los valores de manera aproximada, con base en el promedio requerido de la resistencia (f'_{cr}) para mezclas de prueba. Los valores mostrados, fueron

obtenidos con probetas cilíndricas bajo condiciones normalizadas de laboratorio, curados durante 28 días en ambiente húmedo, con agregado grueso con TMN entre 19 y 25 mm.

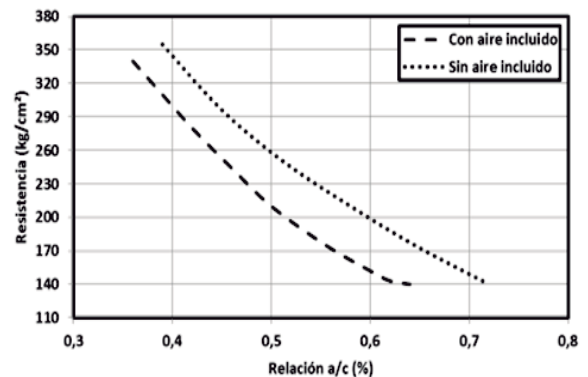


Figura 8.3. Relación aproximada entre resistencia a la compresión y relación a/mc (Adaptado de referencia 8.9)

La selección de la relación a/mc, por durabilidad, se debe realizar con base en lo señalado en el capítulo C.4 de la NSR - 10, donde dicta que las mezclas de concreto deben cumplir con los requisitos más restrictivos en las categorías y clases de exposición establecidas; tal como se muestra en la Tabla 8.5.

Tabla 8.5. Categorías y clases de exposición del concreto según NSR - 10 y sus requisitos

Categoría	Severidad	Clase	Condición		Rel. a/mc máx.	f'c min (MPa)	Requisitos mínimos adicionales			
							Contenido de aire			Límites en los cementantes
F Congelamiento y deshielo	No es aplicable	F0	Concreto no expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo		-	17	-			-
	Moderada	F1	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y exposición ocasional a la humedad		0,45	31	Tabla C.4.4.1 (NSR-10)			-
	Severa	F2	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y en contacto continuo con la humedad		0,45	31	Tabla C.4.4.1 (NSR-10)			-
	Muy severa	F3	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo, que estará en contacto continuo con la humedad y expuesto a productos químicos descongelantes		0,45	31	Tabla C.4.4.1 (NSR-10)			Tabla C.4.4.2 (NSR-10)
S Sulfato			Sulfatos solubles en agua (SO ₄) en el suelo, % en peso ^A	Sulfato (SO ₄) disuelto en agua, ppm ^B			Tipos de material cementante ^C			Uso de aditivo cloruro de calcio
							ASTM C 150	ASTM C 595	ASTM C 1157	
	No aplicable	S0	SO ₄ < 0,10	SO ₄ < 150	N/A	17	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción en el tipo	Sin restricción
	Moderada	S1	0,10 ≤ SO ₄ < 0,20	150 ≤ SO ₄ < 1.500 agua marina	0,50	28	II ^{DyE}	IP (MS) IS (<70) (MS)	MS	Sin restricción
	Severa	S2	0,20 ≤ SO ₄ < 2,00	1.500 ≤ SO ₄ < 10.000	0,45	31	V ^E	IP (HS) IS (<70) (HS)	HS	No se permite
Muy severa	S3	SO ₄ > 2,00	SO ₄ > 10.000	0,45	31	V Puzolanas o escoria ^F	IP (HS) y puzolanas o escoria ^F o IS (<70)(HS) y puzolanas o escoria ^F	HS y puzolanas o escoria ^F	No se permite	

Diseño y Dosificación
8 de mezclas normales

Categoría	Severidad	Clase	Condición	Rel. a/mc máx.	f'c min (MPa)	Requisitos mínimos adicionales		
						Contenido de aire		Límites en los cementantes
P Requiere baja Permeabilidad	No aplicable	P0	En contacto en el agua donde no se requiere baja permeabilidad	N/A	17	Ninguno		
	Requerida	P1	En contacto con el agua donde se requiere baja permeabilidad	0,50	28	Ninguno		
						Contenido máximo de iones de cloruro (Cl ⁻) soluble en agua en el concreto, porcentaje por peso de cemento	Requisitos relacionados	
						Concreto reforzado		
C Protección del refuerzo para la corrosión	No aplicable	C0	Concreto seco o protegido contra la humedad	N/A	17	1,00	0,06	Ninguno
	Moderada	C1	Concreto expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros	0,50	17	0,30	0,06	
	Severa	C2	Concreto expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen	0,40	35	0,15	0,06	Ver NSR-10 7.7.6 y 18.16 ^H

^A El porcentaje en masa de sulfato en el suelo debe determinarse por medio de la norma ASTM C1580.

^B La concentración de sulfatos disueltos en agua en partes por millón, debe determinarse por medio de la norma ASTM D516 o la norma ASTM D4130.

^C Se permiten combinaciones alternativas de materiales cementantes diferentes a los mencionados en la Tabla C.4.3.1, siempre y cuando sean ensayados para comprobar la resistencia a los sulfatos y deben cumplirse los criterios de C.4.5.1.

^D Para exposición al agua marina, son permitidos otros tipos de cemento Portland, con contenidos de hasta 10 % de aluminato tricálcico (C₃A); si la relación a/mc no excede 0.40.

^E Se permiten otros tipos de cemento como el tipo III o tipo I en exposiciones clase S1 o S2, si el contenido de C₃A es menor al 8 o 5 %, respectivamente.

^F La cantidad de la fuente específica de puzolana o escoria que se usará, no debe ser inferior a la cantidad que haya sido determinada, por experiencia en mejorar la resistencia a sulfatos, cuando se usa en concreto que contienen cemento tipo V. De manera alternativa, la cantidad de la fuente específica de puzolana o escoria usada, no debe ser menor a la cantidad ensayada, según la NTC 3330 (ASTM C1012) y debe cumplir con los requisitos de C.4.5.1.

^G El contenido de iones cloruro, solubles en agua, provenientes de los ingredientes -incluyendo el agua-, agregados, materiales cementantes y aditivos de la mezcla de concreto, deben ser determinados según los requisitos de la NTC 4049 (ASTM C1218M), a edades que van de 28 a 42 días.

^H Se deben cumplir los requisitos de C.7.7.5. Véase C.18.16, para tendones de pretensado no adherido.

^I Para concreto liviano véase C.4.1.2.

Paso 6: cálculo del contenido de cemento

Escogida la relación a/mc (paso 5) y estimada la cantidad de agua de mezcla (a) (paso 4), el cálculo de la cantidad de cemento por metro cúbico de concreto se realiza con un simple reemplazo, tal como se indica en la Ecuación 8.1.

$$c = \frac{a}{a/mc} \quad \text{Ecuación 8.1}$$

Donde:

- c: cantidad de cemento, en kg/m³ de concreto.
- a: cantidad de agua de mezclado, en kg/m³.
- a/mc: relación a/mc, adimensional, calculada en masa.

Paso 7: estimación del contenido de agregado grueso (grava)

Según lo estudiado en el Capítulo 3, la obtención de un buen concreto depende, en gran medida, de

la granulometría de los agregados. Por este motivo, antes de dosificar las cantidades de arena y grava, se hace conveniente verificar que la distribución de sus tamaños, esté comprendida en un rango preestablecido y no obtener proporciones de agregado grueso y fino inconvenientes.

El método ACI, por el procedimiento de volumen absoluto, se puede realizar hallando el volumen de agregado grueso, por metro cúbico de concreto. Se basa en el volumen del agregado grueso, seco y compacto, por volumen unitario de concreto (m³), expresado por la relación b/bo, en donde b es el volumen de las partículas de agregado grueso, por metro cúbico de concreto, y bo es el volumen de las partículas del agregado grueso, por metro cúbico de agregado grueso. Los valores b/bo han sido determinados en función del TMN y del módulo de finura de la arena (MF), y se muestran en la Tabla 8.6.

Tabla 8.6. Valores de b/bo para diferentes módulos de finura de la arena y TMN de la grava (8.10)

TMN de la grava, mm	Módulo de finura de la arena											
	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1
9,5	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39
12,5	0,59	0,58	0,57	0,56	0,55	0,54	0,53	0,52	0,51	0,50	0,49	0,48
19	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65	0,64	0,63	0,62	0,61	0,60	0,59	0,58
25	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70	0,69	0,68	0,67	0,66	0,65	0,64	0,63
38	0,80	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70	0,69
50	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,72
75	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,79	0,78	0,77
150	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,88	0,87	0,86	0,85	0,84	0,83

El volumen de las partículas de agregado grueso, por metro cúbico de concreto, se puede calcular multiplicando el valor de b/bo por el valor de bo (volumen de las partículas de agregado grueso, por metro cúbico de agregado grueso), obtenido a partir de la densidad suelta compacta (MUC) y de la densidad aparente de la grava (dg), puesto que:

De tal manera que:

$$bo = \frac{MUC}{dg} \quad \text{Ecuación 8.2}$$

$$b = \left(\frac{b}{bo}\right) * bo \quad \text{Ecuación 8.3}$$

Para concretos que requieran baja trabajabilidad, como es el caso de pavimentos, el volumen de agregado grueso obtenido de la Tabla 8.6, se puede aumentar, en aproximadamente el 10%. Por el contrario, cuando se requieran mezclas más trabajables, como es el caso del bombeo o estructuras con mucho acero de refuerzo, el volumen de agregado encontrado en la Tabla 8.6, se puede disminuir hasta un 10%.

Los valores de la Tabla 8.6 fueron obtenidos por el profesor Alejandro Sandino, que difieren muy poco a los hallados por el ACI. Y se sugieren por ser más amplia la tabla y corresponder a materiales del medio.

Paso 8: cálculo del contenido de agregado fino (arena)

Una vez calculado el contenido de grava, se cuenta con todos los ingredientes, a excepción de la arena. Para facilidad de su cálculo, se pueden organizar los datos como se muestra en la Tabla 8.7, de modo que con ayuda de las densidades de los materiales, se puede hallar la masa y los volúmenes de los materiales. Dado que el diseño de la mezcla se hace para 1 m³ de concreto, el volumen total de los ingredientes conocidos (agua, aire, cemento y agregado grueso), se resta al volumen unitario del concreto, obteniendo así el volumen requerido de arena.

Se sabe que densidad (d):

$$d = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \quad \text{Ecuación 8.4}$$

Conocida la densidad de los materiales (obtenidos en el laboratorio o por datos suministrados) y teniendo la masa o el volumen de los ingredientes por metro cúbico de concreto, se puede calcular el valor desconocido de arena, despejándolo en la Ecuación 8.2.

Tabla 8.7. Proporciones de los materiales de la mezcla en masa y en volumen, para 1 m³ de concreto

Material	Masa, W (kg/m ³) [*]	Densidad aparente (kg/m ³)	Volumen, V (m ³ /m ³)
Agua	W _a	1000	V _w
Aire	0	0	V _a
Cemento	W _c	d _c	V _c
Agregado grueso	W _g	d _g	V _g
Agregado fino	W _f	d _f	V _f
Total	W _T	-	1,00 m ³

Paso 9: ajuste por humedad de los agregados

Como se sabe, la estimación de la cantidad de agua de mezclado se realiza asumiendo que los agregados se encuentran en la condición saturada y superficialmente seca (SSS), es decir, que ni aportan, ni absorben agua. No obstante, de acuerdo con lo explicado en el Capítulo 3, las partículas de agregado usadas en la obra, nunca están en condición SSS, ni

están totalmente secas, lo que significa que siempre tendrían o un exceso de agua (agua libre) o un defecto (por absorción), cantidad que no es independiente del agua de mezclado. Por lo tanto, se debe restar la cantidad en exceso o sumar la cantidad en defecto.

Cuando la humedad que presenta el agregado es mayor que la absorción, significa que hay agua libre con respecto a la condición SSS, caso en el que hay que restar dicha cantidad. Por el contrario, cuando la absorción es mayor que el grado de humedad, hay agua en defecto en relación con la condición SSS; Por lo tanto, se debe sumar esta cantidad. Para determinar el sobrante o faltante de agua, las ecuaciones 8.5 (a) y 8.5 (b), son las indicadas.

Agua en exceso (agua libre):

$$A_L = M * (H - \text{Abs}) \quad \text{Ecuación 8.5 (a)}$$

Agua en defecto:

$$A_D = M * (\text{Abs} - H) \quad \text{Ecuación 8.5 (b)}$$

Donde:

A: agua en exceso o defecto, respecto a la condición SSS.

M: masa de la muestra seca, en kg.

H: humedad del agregado, en tanto por uno.

Abs: absorción del agregado, en tanto por uno.

La humedad del agregado es un dato de laboratorio, determinada mediante la Ecuación 8.6.

$$H = \left[\frac{M_H - M}{M} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 8.6}$$

Donde:

H: humedad de la muestra seca, en %.

M_H: masa de la muestra húmeda, en kg.

M: masa de la muestra seca, en kg.

El dato de la absorción también se obtiene en el laboratorio y se calcula mediante la Ecuación 8.7.

$$\text{Abs (\%)} = \left[\frac{M_{\text{SSS}} - M}{M} \right] * 100 \quad \text{Ecuación 8.7}$$

Dónde:

Abs: absorción de la muestra, en %.

M: masa seca de la muestra seca, en kg.

M_{SSS}: masa de la muestra en estado SSS, en kg.

Como la dosificación de los agregados se hace en húmedo, el cálculo de cada fracción de este (gruesos y finos), para introducirlos en la mezcladora, se realiza con la Ecuación 8.8.

$$M_h = M * (1 + h) \quad \text{Ecuación 8.8}$$

Donde:

Mh: masa húmeda del agregado, kg.

M: masa seca del agregado, kg.

h: humedad del agregado, en tanto por uno.

Paso 10: ajustes a las mezclas de prueba

Cualquiera que sea el método de diseño empleado, este permite calcular las proporciones de los diferentes componentes de la mezcla que, teóricamente, producen el concreto con las propiedades deseadas. Sin embargo, existen algunos factores de los materiales no detectables en los ensayos y precisiones propias del método, y generalmente tienen como consecuencia la producción de un concreto con propiedades algo diferentes a las esperadas. Por ello, se recomienda comprobar que las cantidades teóricas calculadas, cumplan con las características deseadas por medio de mezclas de prueba, las cuales se realizan de acuerdo con el procedimiento descrito en la NTC 550.

Las propiedades que normalmente se verifican en estado fresco, son: la densidad, el rendimiento volumétrico, el contenido de aire y la trabajabilidad (observando además que no presente exudación ni segregación). De acuerdo con los resultados de estas pruebas, se realizan los ajustes pertinentes con las proporciones de las mezclas subsecuentes, siguiendo el siguiente procedimiento sugerido por el ACI:

- a) Se estima nuevamente el agua de mezcla, dividiendo el contenido neto en la mezcla de prueba, entre el rendimiento de la mezcla de prueba, en metros cúbicos. Si el asentamiento de la mezcla en la prueba no fue el correcto, se aumenta o se disminuye la cantidad re-estimada de agua en 2 kg por cada centímetro de aumento o disminución en el asentamiento requerido.
- b) Si el aire contenido que se obtuvo no es el deseado (para concreto con aire incluido), se halla nuevamente el contenido con el aditivo requerido para el aire adecuado, y se aumenta o se reduce el contenido en el agua de mezclado indicado en el numeral anterior en 3 kg/m³, por cada 1% de contenido de aire que deba disminuirse o aumentarse en la mezcla de prueba.
- c) Se calculan las nuevas masas de la mezcla, partiendo de la elección de la relación a/mc. Si es necesario, se modifica el volumen de agregado grueso mostrado en la Tabla 8.6, con el objeto de lograr una trabajabilidad adecuada.
- d) Se calcula la densidad y el rendimiento volumétrico. La masa unitaria consiste en determinar el volumen de concreto producido a partir de las cantidades conocidas de los materiales componentes, para verificar la correcta dosificación y el rendimiento en los materiales. La densidad está determinada por la Ecuación 8.9 y el rendimiento volumétrico mediante la Ecuación 8.10.

$$W = \frac{(W_{\text{mat}} + w_{\text{recip}} - W_{\text{recip}})}{V_{\text{recip}}} \quad \text{Ecuación 8.9}$$

Donde:

W: densidad del concreto.

W_{mat. + recip.}: masa de la mezcla fresca + masa del recipiente de medida.

W_{recip.}: masa del recipiente de medida.

V: volumen del recipiente de medida.

$$Y = \frac{W_T}{W} [m^3] \quad \text{Ecuación 8.10}$$

Donde:

Y: volumen de concreto producido por dosificación (rendimiento volumétrico).

W: densidad (masa unitaria) del concreto.

W_T : masa total de todo el material dosificado ($W_1 = W_{\text{agregado}} + W_{\text{cimento}} + W_{\text{agua}}$).

8.2.2 Método de la Road Note Laboratory - RNL

Optimización granulométrica

En muchas ocasiones ocurre que la granulometría de los agregados disponibles para producir la mezcla no se encuentra gradada convenientemente. Para estos casos, la RNL de la Gran Bretaña desarrolló un método gráfico para optimizarlos granulométricamente, mezclando la arena y la grava en una proporción tal, que se puedan lograr relaciones de agregado fino a agregado grueso convenientes.

Para lograrlo, es necesario hacer uso de una gradación que involucre todo el agregado, desde las partículas más finas de la arena, hasta las partículas más grandes de la grava. Se han desarrollado varias granulometrías que involucran todo el agregado, destacándose la de Bolomey, y la de Fuller y Thompson, siendo esta última la más conocida y usada, y cuya expresión matemática es la Ecuación 8.11. Los valores de la granulometría resultante se presentan en la Tabla 8.8.

$$P = 100 \times \left[\frac{d}{D} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación 8.11}$$

Donde

P: % de material que pasa el tamiz de abertura d.

D: tamaño máximo de la masa de agregados, mm o pul.

d: tamaño del tamiz respectivo, mm o pul.

Es de anotar que la ecuación de Fuller y Thompson, desarrollada hacia mediados de los años 1950, emplea el concepto del TM en lugar del TMN, que se desarrolló años más tarde. Así mismo, las mezclas elaboradas con estas granulometrías, tienden a ser ásperas, debido a las deficiencias de la fracción fina de la arena, siendo especialmente notorio en mezclas con menos de 350 kg de material cementante.

Tabla 8.8. Granulometría de Fuller y Thompson para los TM mostrados

Pulgadas	Tamiz mm	Tamaño máximo, TM				
		50 mm (2")	37,5 mm (1 ½")	25 mm (1")	19 mm (¾")	12,5 mm (½")
2	50	100	-	-	-	-
1 ½	37,5	87	100	-	-	-
1	25	71	82	100	-	-
¾	19	61	71	87	100	-
½	12,5	50	58	71	82	100
¾	9,5	43	50	61	71	87
No. 4	4,75	31	35	43	50	62
No. 8	2,36	22	25	31	35	44
No. 16	1,18	15	18	22	25	31
No. 30	0,600	11	12	15	18	22
No. 50	0,300	8	9	11	13	16
No. 100	0,150	5	6	8	9	10

Con estas consideraciones, se puede escoger una gradación para optimizar la granulometría y lograr un concreto de buenas propiedades de manejabilidad y resistencia. El método de optimización de la RNL consiste en lo siguiente:

- Dibujar un cuadro de 10 divisiones en las ordenadas, por 10 divisiones en las abscisas, tal como se aprecia en la Figura 8.4. Enumerar los ejes de las ordenadas de abajo hacia arriba de 0 a 100. Para los ejes de las abscisas, el superior de 0 a 100 de izquierda a derecha; y el inferior, de derecha a izquierda de 0 a 100. Visto así, cualquier valor en el rango superior, sumado al correspondiente valor inferior, da como resultado 100.
- Escoger el eje superior como eje de porcentajes de la arena y el inferior como eje de porcentajes de la grava.
- Sobre el eje de las ordenadas, correspondiente al 100% de la arena, marcar la granulometría de la arena; y sobre el eje correspondiente al 100% de la grava, marcar la granulometría de la arena.
- Se unen los puntos correspondientes a cada tamiz en las dos granulometrías por medio de líneas rectas. Se tienen, entonces, líneas inclinadas que representan los posibles porcentajes de mezcla de agregados que pueden pasar cada uno de los tamices.

- Colocar los puntos de la especificación de Fuller y Thompson correspondientes al TM de la Tabla 8.8 sobre las líneas inclinadas.
- Trazar un eje vertical que separe los puntos hallados, en igual cantidad a la izquierda y a la derecha. A este eje le corresponde un porcentaje de arena y un porcentaje de grava, que representa la mezcla óptima.

Como se puede ver, la solución gráfica es sencilla y rápida. No obstante, es conveniente tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Las especificaciones granulométricas están dadas en función del TMN, mientras que los estudios granulométricos desarrollados, que involucran todo el agregado, están en función del TM; como se sabe, estos valores a veces no coinciden.
- El método es aproximado y su dependencia, en gran medida, se da por la precisión de la gráfica y la localización de la línea vertical.
- La granulometría hallada cumple con las especificaciones.
- El método se puede aplicar para más de dos agregados, combinando primero las porciones gruesas y la granulometría resultante se combina con la fracción fina.

Ejemplo:

Aplicar el procedimiento explicado de optimización de granulometría.

En la Tabla 8.9 se indican las granulometrías de dos agregados; Se desea saber cuál es su mezcla óptima para elaborar una mezcla de concreto.

La solución gráfica, siguiendo los pasos antes indicados, se enseña en la Figura 8.4 de donde se tiene que la combinación óptima se encuentra con el 48% de arena y el 52% de grava. Para tomar en cuenta dos cosas, la primera, la granulometría tanto de la grava como de la arena se encuentran fuera de las especificaciones dadas por la NTC 174 (ASTM C33), para un TMN de 25 mm (1"); la segunda, que la granulometría tomada de Fuller y Thompson como referencia, corresponden al TM de 25 mm (1").

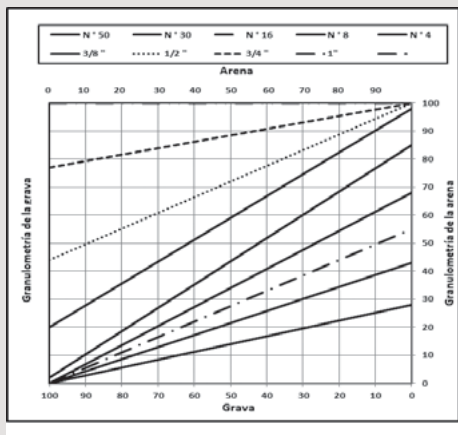


Figura 8.4. Optimización de las granulometrías del ejemplo

Estimación del contenido de agregados (grava y arena)

El contenido de grava y arena por metro cúbico de concreto, se calcula por sustracción, es decir, se cuenta con los volúmenes de cemento, agua y aire, si se resta a 1 m^3 la suma de estos tres valores se obtiene el volumen del agregado total (grava + arena).

Para el cálculo específico de la cantidad de grava y de arena, es necesario determinar el promedio ponderado de la densidad, denominada como densidad aparente promedio de los agregados. Esta se calcula por medio de las expresiones 8.12 u 8.13.

Tamiz		% pasa		
mm	Pulgadas	Grava	Arena	Material combinado
25	1	100	-	100
19	¾	77	-	88
12,5	½	44	100	72
9,5	3	19	99	56
4,75	No. 4	2	85	42
2,36	No. 8	-	68	32
1,18	No. 16	-	54	26
600 µm	No. 30	-	43	21
300 µm	No. 50	-	28	14

Tabla 8.9. Ejemplo de optimización de granulometrías.

$$d_{\text{prom}} = (d_g * d_f) / (\%_f * d_g + \%_g * d_f)$$

Ecuación 8.12

$$d_{\text{prom}} = \%_f * d_f + \%_g * d_g$$

Ecuación 8.13

Donde:

- d_g : densidad aparente de la grava.
- d_f : densidad aparente de la arena.
- d_{prom} : densidad aparente promedio.
- $\%_f$: porcentaje de la arena, en forma decimal.
- $\%_g$: porcentaje de la grava, en forma decimal.

La Ecuación 8.12 se utiliza cuando la diferencia entre las densidades de la arena y de la grava es grande, mientras que si los valores son parecidos, caso muy frecuente, se utiliza la Ecuación 8.13.

Conocido el volumen de agregados, y calculada la densidad aparente promedio de los mismos, se puede determinar la masa de la grava y de la arena, completándose así todos los ingredientes de la mezcla para 1 m³ de concreto. Los cálculos se facilitan elaborando un cuadro similar a la Tabla 8.10, así:

Tabla 8.10. Tabla de diseño de mezclas por método RNL

Material	Masa, W (kg/M ³)	Densidad aparente (kg/m ³)	Volumen, V (m ³ /m ³)
Agua	W _a	1000	V _w
Aire	0	0	V _a
Cemento	W _c	d _c	V _c
Agregado grueso	W _g	d _{prom}	V _g
Agregado fino	W _f	d _{prom}	V _f
Total	W _T	-	1,00 m ³

$$d_{\text{prom}} = W_T / V_T$$

Ecuación 8.14

Donde:

- W_T: masa total de agregados por m³ de concreto.
- V_T: volumen total de agregados por m³ de concreto.

O sea que: $(d_{\text{prom}}) * (V_T) = W_T$.

De otra parte se sabe que: $W_g = (W_T) * (\%_g)$, de donde se tiene que la masa de la grava (W_g), será:

$$W_g = d_{\text{prom}} * V_T * \%_g$$

Ecuación 8.15

Y por consiguiente la de la arena (W_f), será:

$$W_f = d_{\text{prom}} * V_T * \%_f$$

Ecuación 8.16

8.2.3 Dosificación de mezclas de concreto según los criterios de la NSR - 10

El Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistente, más conocido como NSR - 10, que es, tal vez, el referente técnico de mayor importancia en el país, establece todos los requisitos mínimos para dosificación de los componentes en una mezcla, tendientes a garantizar las características más relevantes del concreto como son, la manejabilidad, la resistencia a la compresión y la durabilidad, basados en experiencias de obras anteriores, o mezclas de prueba, o ambas.

Terminología

Los siguientes son los términos usados en la NSR - 10:

f'c: resistencia nominal del concreto a la compresión, expresada en MPa. Es la resistencia especificada por el calculista y debe estar indicada claramente en cada uno de los elementos que componen la estructura.

f'cr: resistencia promedio requerida del concreto a la compresión, utilizada como base para dosificar las mezclas, expresada en MPa.

S: desviación estándar, expresada en MPa.

Requisitos de dosificación exigidos por la NSR - 10

La NSR - 10 establece que la dosificación del concreto se debe establecer dependiendo

Tabla 8.11. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra (8.4)

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c \leq 35$	Usar el mayor valor obtenido de las Ecuaciones 8.18 y 8.19 $f'_{cr} = f'_c + 1.34 * S$ Ecuación 8.18 $f'_{cr} = f'_c + 2.33 * S - 35$ Ecuación 8.19
$f'_c > 35$	Usar el mayor valor obtenido con las Ecuaciones 8.20 y 8.21 $f'_{cr} = f'_c + 1.34 * S$ Ecuación 8.20 $f'_{cr} = 0,90 f'_c + 2.33 * S$ Ecuación 8.21

si se dispone o no de datos o experiencia en obras anteriores o mezclas de prueba.

En general, la resistencia promedio requerida, f'_{cr} , será la resistencia nominal del concreto a la compresión, f'_c , más una resistencia de seguridad, f_s , cuyo valor dependerá de la cantidad de registros que se dispone y de su desviación estándar, S ; es decir:

$$f'_{cr} = f'_c + f_s \quad \text{Ecuación 8.17}$$

Dosificación basada en experiencia de obras anteriores en mezclas de prueba o en ambas

Cuando hay registros de ensayos, la resistencia promedio requerida f'_{cr} , se puede determinar acorde con las ecuaciones dadas en la Tabla 8.11.

La NSR - 10 establece que la desviación estándar se debe calcular utilizando los registros de ensayos de menos de 12 meses de antigüedad que cumplan lo siguiente:

- (a) Representar materiales, procedimientos que controlen la calidad y condiciones similares a las esperadas; Las variaciones de los materiales y las proporciones dentro de la muestra no debe haber sido más restrictivas que las de la obra propuesta.

- (b) Representar un concreto producido para que cumpla con una resistencia, o resistencias a la compresión especificada, dentro de 7 MPa de f'_c .
- (c) Tener, al menos 30 ensayos consecutivos, o de dos grupos de ensayos consecutivos totalizando por lo menos 30 ensayos.

Se entiende como ensayo de resistencia, al resultado del promedio de 2 cilindros, tomados de una misma mezcla y ensayados a los 28 días, o a la edad especificada en caso de que sea menor a 28 días.

Cuando la instalación productora de concreto no tenga registros de ensayos que se ajusten al literal (c), pero si tenga registro de ensayos de menos de 12 meses de antigüedad, basados entre 15 y 29 ensayos consecutivos, la desviación estandar se afecta por un factor dado en la Tabla 8.12. No obstante, para que sean válidos, deben cumplir con los literales (a) y (b) y representar un solo registro de ensayos consecutivos, en un periodo no menor a 45 días calendario consecutivo. Se puede obtener un factor para valores diferentes a los relacionados en la tabla 8.13, haciendo la correspondiente interpolación.

Tabla 8.12. Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra cuando se dispone de menos de 30 ensayos (8.4)

Nº de ensayos	Factor de modificación para la desviación estándar de la muestra
Menos de 15	Usar Tabla 8.13
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 o más	1,00

La desviación estándar, S, se calcula por medio de la Ecuación 8.22.

$$S = \left[\frac{\sum (x - x_i)^2}{(n - 1)} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación 8.22}$$

Donde:

S: desviación estándar, MPa.

x: promedio aritmético de los n ensayos de resistencia.

x_i: cada uno de los valores individuales de los ensayos de resistencia.

Cuando no hay disponibles registros de ensayos para calcular la desviación estándar, la resistencia promedio requerida f'cr se determina con base en lo establecido en la Tabla 8.13.

Tabla 8.13 . f'cr cuando no hay datos para calcular S (8.4)

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
f'c < 21	f'cr = f'c + 7
21 ≤ f'c ≤ 35	f'cr = f'c + 8,5
f'c > 35	f'cr = 1,10f'c + 5,0

Dosificación sin experiencia en obras anteriores o mezclas de prueba

Cuando no hay datos, la NSR - 10 establece que la dosificación se puede realizar usando otra información o experiencias, siempre y cuando lo apruebe el profesional facultado para diseñar. Cuando se opta por ésta alternativa, la resistencia máxima (f'c), su dosificación es de 35 MPa, y el f'cr debe ser de f'c + 8,3 MPa, producido con materiales similares a los que se van a emplear en la obra. La mezcla propuesta debe cumplir con todos los requisitos de resistencia y durabilidad exigidos.

Reducción de la resistencia promedio

Como se puede apreciar en lo anteriormente expuesto, el incremento en la resistencia es más riguroso, a medida que se disponga de menos datos, afectando directamente el costo de la mezcla. No obstante, conforme se vayan consiguiendo datos, la

NSR - 10 da la opción de efectuar una reducción de f'cr cuando se tengan las siguientes condiciones:

- Haya más de 30 ensayos y su promedio exceda el requerido en la Tabla 8.11.
- Haya entre 15 y 29 ensayos y su promedio exceda el requerido, en el caso de que no se disponga de registros de ensayos previos.
- Se cumplen las condiciones de durabilidad de la estructura.

8.3 Ejemplos de aplicación

8.3.1 Ejemplo 8.1

Datos generales de la obra

Se pide diseñar el concreto para un muro de contención reforzado, como el mostrado en la Figura 8.5. Los estudios indican que la estructura no estará expuesta a condiciones agresivas; el suelo estará en contacto con el concreto y tiene un contenido de SO₄ de 0,03% y un nivel freático que varía en época de lluvias, aunque dispondrá de un sistema de drenaje. La temperatura de la zona varía entre 10 °C y 25 °C.

El diseño estructural exige una resistencia a la compresión (f'c), a los 28 días de 28 MPa (280 kg/cm² ó 4.000 psi). El diseño estructural contempla un espaciamiento del acero de refuerzo con 100 mm; la dimensión mínima del elemento es 400 mm y tiene una losa con altura de 400 mm, necesitando unos 1.200 m³ de concreto.

Por las condiciones de acceso y esbeltas estructural, se dispone de una bomba para la colocación del concreto, con una tubería con 100 mm de diámetro.

Datos de los materiales

Del agregado grueso

- Granulometría: los valores del ensayo granulométrico se muestran en la Tabla 8.14. Están bien gradados y cumplen con la especificación de la NTC 174.

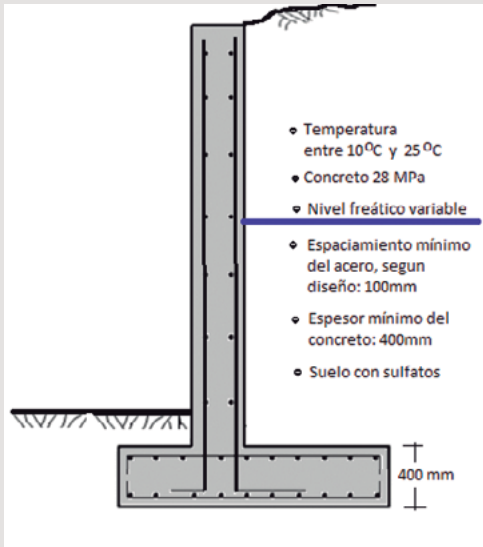


Figura 8.5. Esquema del muro de contención para el ejemplo 8.1

Tabla 8.14. Granulometría del agregado grueso del ejemplo 8.1

TAMIZ		% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
mm	Pulgadas			
50,8	2	0	0	100
38,1	1 ½	3	3	97
25,4	1	17	20	80
19,0	¾	20	40	60
12,5	½	30	70	30
9,5	¾	10	80	20
4,8	No. 4	16	96	4
Fondo		4	100	0

De donde se tiene que: $TM = 50 \text{ mm}$ (2") y $TMN = 38 \text{ mm}$ (1 ½")

Masas Unitarias:

MUC 1.560 kg/m³

MUS 1.540 kg/m³

Densidad aparente: 2.470 kg/m³

Absorción (Abs.g): 2,50%

Humedad natural (Hg) 4,00%

Origen aluvial: Textura lisa y forma redondeada

De la arena

- Granulometría: el ensayo granulométrico muestra los valores enseñados en la Tabla 8.15. Se encuentran bien gradados, cumpliendo con la especifica-

ción de la NTC 174. El MF calculado es de 3,05.

Masas Unitarias:

Masa unitaria compacta MUC 1.590 kg/m³

Masa unitaria suelta MUS 1.460 kg/m³

Densidad aparente: 2.540 kg/m³

Absorción (Abs.g): 1,3%

Ensayo colorimétrico No 2

Humedad natural (Hf) 8,00%

Origen aluvial: Textura lisa y forma redondeada

El agua utilizada es del acueducto de la región y con cemento tipo ART, con una densidad aparente de 3.100 kg/m³.

Tabla 8.15

TAMIZ		% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
mm	Pulgadas			
9,5	¾	0	0	100
4,75	Nº 4	2	2	98
2,36	Nº 8	8	10	90
1,18	Nº 16	30	40	60
0,600	Nº 30	30	70	30
0,300	Nº 50	15	85	15
0,150	Nº 100	13	98	2
Fondo		2	100	0

Procedimiento de dosificación basado en el método ACI

Paso 1: elección del asentamiento

De la Tabla 8.1, para muros reforzados, dada la esbeltez del elemento se puede elegir un asentamiento de 100 mm. Como el medio de colocación es con bomba, la manejabilidad se ajustará con un aditivo plastificante para que al final sea de 150 mm, pero el diseño base se hará con 100 mm.

Paso 2: elección del tamaño máximo nominal - TMN

El TMN está limitado por las dimensiones de la estructura y, en este caso, por la bomba.

Por dimensiones de la estructura:

- Por separación de acero: $TMN < \frac{3}{4} * (100 \text{ mm}) = 75 \text{ mm}$.
- Por menor dimensión de formaleta: $TMN < \frac{1}{5} * (400 \text{ mm}) = 80 \text{ mm}$.

- Por altura de la losa: $TMN < 1/3 \cdot (400 \text{ mm}) = 133,3 \text{ mm}$.
De modo que por dimensiones de la estructura, el TMN debería ser de 75 mm (3").

Por colocación con bomba:

- Diámetro de la tubería: 100 mm.
- Agregados de forma redondeada y textura lisa.
- $TMN < (40/100) \cdot (100 \text{ mm}) = 40 \text{ mm}$.

Prima el menor de todos los criterios anteriores: 40 mm. El TMN del agregado disponible de 38 mm, para efectos prácticos, se puede considerar adecuado para este caso.

Paso 3: estimación del contenido de aire

El muro no estará expuesto a ambientes agresivos ni a ciclos de congelamiento y deshielo, por tanto no se requiere del uso de incorporador de aire. La cantidad de aire atrapado, de la Tabla 8.2, para un TMN de 38 mm (1½"), se tiene una cantidad aproximada de 1,5 % ó 0,015 m³/m³ de concreto.

Paso 4: estimación de la cantidad de agua de mezclado (a)

De acuerdo con lo expuesto, para un TMN de 38 mm (1½"), agregados de forma redondeada y textura lisa, asentamiento de 100 mm y concreto sin aire inducido, se tiene:

- De la Figura 8.2: 171 kg/m³
- De la Tabla 8.4: 175 kg/m³. Se puede adoptar cualquiera de los dos. Para este caso, se escoge 175 kg/m³.

Paso 5: elección de la relación agua/cemento (a/c)

Se diseñará básicamente por resistencia y por durabilidad.

- Diseño por resistencia:

- No se cuenta con curvas de relación a/mc propias de los materiales.
- Haciendo uso de la figura 8.3, se tiene que, para una resistencia de 28 MPa (280 kg/cm²), y para un concreto sin aire incluido, se requiere una relación a/c de 0,47.

- Diseño por durabilidad:

- No se prevén condiciones de exposiciones adversas.
- El terreno presenta un contenido de SO₄ de 0,03% en masa. La Tabla 8.5 se cataloga como un concreto SO (SO₄ < 0,1% en masa), con gra-

do de severidad despreciable. De acuerdo con la Tabla 8.5, exige una resistencia mínima a la compresión (f'c) de 17 MPa, siendo menor que la solicitada por el calculista, de 28 MPa, y no tiene restricción en los requisitos mínimos adicionales.

- También se cataloga como P1, exigiendo una f'c mínima de 28 MPa y una relación a/mc < 0,5 y sin restricción a los requisitos mínimos adicionales.
- Además se puede considerar como C0, que exige f'c mínima de 17 MPa y un contenido máximo de ion cloruro de 1%.
- Finalmente, el grado de exposición es un FOSOP1C0, según los requisitos de la NSR-10.

Por lo anterior, prima la relación a/mc de 0,47 y una f'c de 28 MPa. No se deben usar aditivos con cloruros.

Paso 6: cálculo del contenido de cemento (material cementante)

- Relación a/mc (en masa) elegida = 0,47.
- Cantidad de agua calculada: 175 kg/m³.
- $mc = (175 \text{ kg/m}^3) / 0,47 = 372 \text{ kg/m}^3$.
- El volumen de cemento (Vc), por metro cúbico de concreto, será:
- $Vc = (372 \text{ kg/m}^3) / 3100 \text{ kg/m}^3 = 0,120 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Paso 7: estimación del contenido de grava

- Para un módulo de finura de la arena de 3,05 y un TMN de 38 mm, se obtiene en la Tabla 8.6, un valor igual a b/bo = 0,70
- $bo = MUC/dg = (1.560 \text{ kg/m}^3) / (2.470 \text{ kg/m}^3) = 0,632$
- $b = b/bo \cdot bo = 0,70 \cdot 0,632 = 0,442 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Paso 8: estimación del contenido de arena

El volumen de arena será el complemento a 1 m³, sumando el volumen de los ingredientes ya encontrados, o sea:

El volumen de arena = $1 - (0,015 + 0,175 + 0,120 + 0,442) = 0,248 \text{ m}^3/\text{m}^3$.

Las cantidades en masa y en volumen, por metro cúbico de concreto, se presentan en forma ordenada en la Tabla 8.16.

Tabla 8.16. Cantidades para 1 m³ de la mezcla del ejemplo 8.1

Material	Masa, W (kg/M ³)	Densidad aparente (kg/m ³)	Volumen, V (m ³ /m ³)	Ajustes por humedad (kg/m ³)
Agua	175	1000	0,175	116
Aire	0	0	0,015	0
Cemento	372	3.100	0,120	372
Grava	1.092	2.470	0,442	1.136
Arena	630	2.540	0,248	680
Total	2.269 kg/m ³		1,00 m ³	

Paso 9: ajuste por humedad de los agregados

Para preparar la mezcla, se realiza el ajuste por humedad de los agregados:

Masas húmedas de los agregados:

- Masa húmeda de la grava:
 $M_{hg} = 1.092 \cdot (1 + 0,04) = 1.136 \text{ kg/m}^3$
- Masa húmeda de la arena:
 $M_{hf} = 630 \cdot (1 + 0,08) = 680 \text{ kg/m}^3$

Agua en exceso o en defecto:

Para la grava:

$$H_g = 0,04$$

$$Abs.g = 0,025$$

Como la humedad es mayor que la absorción, significa que la grava tiene agua en exceso, o agua libre. Por tanto, la cantidad de agua a restarle del agua calculada (asumida en condición SSS), será:

$$A_g = 1.092 \cdot (0,04 - 0,025) = 16,38 \text{ kg}$$

Para la arena:

$$H_f (0,08) > Abs.f (0,013)$$

Significa que también tiene agua en exceso. Por tanto, la cantidad de agua a restarle del agua calculada, será:

$$A_f = 630 \cdot (0,08 - 0,013) = 42,21 \text{ kg.}$$

Agua total de exceso (A):

$A = A_g + A_f = 16,38 + 42,21 = 58,6 \text{ kg}$ que irán con los agregados.

De tal manera, que la cantidad de agua para dosificar será de:

$$175 - 58,6 = 116 \text{ kg/m}^3$$

Paso 10: ajuste a la mezcla de prueba

Suponiendo que en la primera mezcla de prueba se obtuvo un asentamiento de 8 cm, y como el deseado es de 10 cm, se debe hacer el respectivo ajuste.

Ajuste del agua de mezclado

La mezcla de prueba se elaboró con 20 litros (0,020 m³), de tal forma, que la cantidad en masa de los ingredientes fue de:

Agua (añadida): 2,32 kg
Cemento: 7,44 kg
Grava (húmeda): 22,72 kg
Arena (húmeda): 13,60 kg
Masa del material dosificado (W): 46,08 kg

En el cálculo de la densidad (masa unitaria) del concreto fresco (Ecuación 8.9), se obtuvo un valor de 2.380 kg/m³.

Puesto que el rendimiento de la mezcla de prueba fue de:

$$Y = (46,08 / 2.380) = 0,0194 \text{ m}^3$$

Y en el contenido neto del agua de mezcla, para la mezcla probada, fue:

$$2,32 \text{ kg (agua añadida)}$$

$$+ 16,38 \times 0,02 \text{ kg (por agua libre en la grava)}$$

$$+ 42,21 \times 0,02 \text{ kg (por agua libre en la arena)}$$

$$= 3,49 \text{ kg}$$

En el agua de mezclado, la cantidad requerida para un metro cúbico de concreto con el mismo asentamiento en la mezcla de prueba, debe ser:
 $(3,49 / 0,0194) = 180 \text{ kg/m}^3$.

Como se anotó anteriormente, esta cantidad se debe incrementar en 2 kg por cada cm de defecto en el asentamiento. Para aumentar el asentamiento de 8 a 10 cm, es necesario agregar agua hasta 4 kg. O sea que

es necesaria una cantidad total de $180 + 4 = 184 \text{ kg/m}^3$ como agua de mezclado.

Ajuste de la cantidad de cemento

Al aumentar el agua de mezclado, es necesario agregar cemento adicional para mantener constante la relación a/mc diseñada de 0,47. La cantidad de cemento reajustado es: $(184/0,47) = 391,5 \text{ kg/m}^3$.

Ajuste en la cantidad de grava

Suponiendo que se ha encontrado satisfactoria la trabajabilidad, se puede conservar la cantidad de grava por volumen unitario de concreto utilizada en la mezcla de prueba.

Así, la cantidad de grava por metro cúbico es de: $22,72/0,0194 = 1.171 \text{ kg/m}^3$ (húmeda).

La cantidad en masa seca, es de: $1.171/1,04 = 1.126 \text{ kg/m}^3$.

Y la cantidad en masa SSS, es: $1.126 * 1,025 = 1.154 \text{ kg/m}^3$ (SSS).

Ajuste en la cantidad de arena

La cantidad requerida de arena se determina por diferencia de masas, toda vez que se conoce la densidad del concreto y las masas del cemento, del agua y de la grava.

Densidad del concreto	2.380 kg/m ³
Masa del cemento	391,5 kg/m ³
Masa del agua	184 kg/m ³
Masa de la grava (SSS)	1.154 kg/m ³

De tal forma que la cantidad de arena es de:

$2.380 - (391,5 + 184 + 1.154) = 650,5 \text{ kg (SSS)}$

En masa seca es:

$650,5/1,013 = 642 \text{ kg/m}^3$

Las masas de la mezcla por metro cúbico de concreto son:

Agua neta de mezclado	184 kg/m ³
Cemento	391,5 kg/m ³
Grava (seca)	1.126 kg/m ³
Arena (seca)	642 kg/m ³

Ajuste por bombeo del concreto

Dado que la mezcla será colocada mediante bomba, se debe ajustar la manejabilidad de 100 a 150 mm

de asentamiento. Asumiendo que se empleará un aditivo superplastificante, cuya dosis recomendada es de 1,2 % ppc (por peso del cemento), la cantidad por metro cúbico a dosificar será:

$391,5 \text{ kg} * 1,2/100 = 4,7 \text{ kg de aditivo/m}^3$.

La densidad del aditivo es de 1.185 kg/m^3 , de modo que la dosis en volumen será de:

$V = 4,7 \text{ kg}/1.185 \text{ kg/m}^3$

$V = 0,00396 \text{ m}^3/\text{m}^3$ ó

$V = 3,96 \text{ l/m}^3$

La cantidad de aditivo para elaborar la mezcla de prueba ($0,020 \text{ m}^3$) y corroborar el asentamiento de 150 mm, es de:

$4,33 \text{ l/m}^3 * 0,020 \text{ m}^3 = 0,080 \text{ l}$

8.3.2 Ejemplo 8.2

Datos generales de la obra

Se necesita elaborar concreto para construir las columnas de un muelle, que estarán en contacto con agua dulce, en condiciones severas de exposición F2SOP1C1, donde se especifica el uso de aire incorporado. El diseño estructural exige una resistencia a la compresión a los 28 días de $f'c = 31 \text{ MPa}$ (310 kg/cm^2). Las condiciones de colocación permiten el uso de agregado grande, pero solo está disponible uno en la zona, que cuentan con una calidad satisfactoria.

Datos de los materiales

De los agregados

- Granulometría: el análisis granulométrico, tanto para la grava como para la arena se relaciona en la Tabla 8.17.

Tabla 8.17. Granulometría de los Agregados del Ejemplo 8.2

Tamiz		% pasa		
mm	Pulgadas	Grava	Arena	Material combinado
25	1	100		100
19	¾	77		88
12,5	½	44	100	72
9,5	3/8	19	99	56
4,75	No. 4	2	85	42
2,36	No. 8		68	32
1,18	No. 16		54	26
0,600	No. 30		43	21
0,300	No. 50		28	14
0,150	No. 100		9	4

Propiedad agregado	Grava	Arena
Densidad aparente kg/m ³	2.420	2.590
Masa unitaria compacta, MUC, kg/m ³	1.620	1.650
Forma	Angular	Angular
Humedad	3,00%	5,00%
Absorción	2,00%	1,0%

Del cemento

Se utilizará cemento tipo ART, que cumpla con la NTC 121, cuya densidad es de 3.100 kg/m³.

Del agua

Se empleará agua del acueducto de la localidad.

Procedimiento de dosificación

Paso 1: elección del asentamiento

Las condiciones de colocación y el tipo de estructura, de acuerdo con la tabla 8.1, permiten una mezcla con un grado de trabajabilidad entre pequeño y medio. Para efectos del diseño, se asumirá un asentamiento de 100 mm.

Paso 2: elección del TMN

El TMN disponible es de 25 mm (1").

Paso 3: estimación del contenido de aire

De acuerdo con la información preliminar, la estructura estará expuesta a ambiente severo, especificándose el uso de aire incorporado. De la Tabla 8.3, para un TMN de 25 mm (1") y para concretos F2, se tiene un promedio total de aire de 6%.

Paso 4: estimación de la cantidad de agua de mezclado

Como se trata de una mezcla con aire incluido, usando la Tabla 8.4, la cantidad de agua es de 175 kg/m³, para un TMN de 25 mm y un asentamiento de 100 mm.

Paso 5: elección de la relación a/mc

- Por resistencia: de acuerdo con la Figura 8.3, la relación a/mc necesaria para producir una resistencia de 31 MPa (310 kg/cm²), en un concreto con aire incluido, se estima en 0,38.

- Por durabilidad, la Tabla 8.5 son concretos P1 y C1.
- El concreto P1 requiere de una relación a/mc máxima de 0,5 y f'c mínimo de 28 MPa.
- El concreto C1 requiere de una relación a/mc máxima de 0,5 y f'c mínima de 17 MPa.

Del anterior análisis, se concluye que la relación a/mc será de 0,38 y f'c de 31 MPa.

Paso 6: cálculo del contenido de cemento

Conocidas la relación a/mc y la cantidad de agua de mezclado, el contenido requerido de cemento, será de:

$$c = 175/0,38 = 460 \text{ kg/m}^3$$

Y el volumen que ocupará esta masa de cemento, será:

$$V_c = 460/3.100 = 0,148 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Paso 7: cálculo del contenido de agregados

Como se puede apreciar de la Tabla 8.17, la granulometría de los agregados no es la adecuada, dado que algunos de los tamaños no cumplen con los rangos granulométricos establecidos, de manera que para usar los agregados disponibles, se hace necesario optimizar la granulometría mediante el método sugerido por la RNL.

De la Figura 8.4, se observa que la mezcla óptima estará compuesta de 48% de arena y 52% de grava.

El volumen de agregados, por metro cúbico en concreto, será de:

$$V_{\text{agregados}} = 1 - (0,06 + 0,148 + 0,175) = 0,617 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

De los cuales:

$$V_f = 0,617 \times 0,48 = 0,296 \text{ m}^3/\text{m}^3,$$

estarán ocupados por arena y

$$v_g = 0,617 \times 0,52 = 0,321 \text{ m}^3/\text{m}^3,$$

serán de grava

Para calcular las masas secas respectivas, hay que conocer la densidad aparente promedio. Como la densidad aparente de la grava ($d_g = 2.420 \text{ kg/m}^3$) difiere poco del de la arena ($d_f = 2.590 \text{ kg/m}^3$), se puede emplear la Ecuación 8.7.

$$d_{\text{prom}} = 0,48 * 2.590 + 0,52 * 2.420 = 2.502 \text{ kg/m}^3$$

Las masas secas de la grava y de la arena para la mezcla, serán de:

$$W_f = 2.502 * 0,617 * 0,48 = 741 \text{ kg/m}^3$$

$$W_g = 2.502 * 0,617 * 0,52 = 803 \text{ kg/m}^3$$

De esta forma quedan determinados todos los ingredientes de la mezcla, que se aprecian en la Tabla 8.18.

Tabla 8.18. Cantidades para 1m³ de concreto del Ejemplo 8.2

Material	Masa, W (kg/M ³)	Densidad aparente (kg/m ³)	Volumen, V (m ³ /m ³)	Ajustes por humedad (kg/m ³)
Agua	175	1000	0,175	137,5
Aire	0	0	0,060	0
Cemento	460	3100	0,148	460
Grava	803	2502	0,321	827,09
Arena	741	2502	0,296	778,05
Total	2.179 kg/m ³	-	1,00 m ³	-

Paso 8: ajustes por humedad de los agregados

Para el montaje de las mezclas de prueba en el laboratorio, se requiere realizar el ajuste por la humedad de los agregados, para determinar la cantidad de agua total de mezclado.

- Masas húmedas de los agregados.
 - Masa humedad de la grava: $M_{hg} = 803 * (1 + 0,03) = 827,09 \text{ kg/m}^3$.
 - Masa humedad de la arena: $M_{hf} = 741 * (1 + 0,05) = 778,05 \text{ kg/m}^3$.
- Agua en exceso o en defecto
 - Para la grava: $A_g = 803 * (0,03 - 0,02) = 8,03 \text{ kg}$.
 - Para la arena: $A_f = 741 * (0,05 - 0,01) = 29,64 \text{ kg}$.
- $AL = 8,03 + 29,64 = 37,67 \text{ kg}$.
- La cantidad total de agua de mezclado, será: $175 - 37,67 = 137,3 \text{ kg/m}^3$.

Paso 9: ajustes a la mezcla de prueba

Con las cantidades de los ingredientes calculados anteriormente, se elabora la mezcla de prueba y se mide el asentamiento y la masa unitaria del concreto fresco. Con estos datos, se pueden realizar los ajustes pertinentes de forma similar al ejemplo anterior.

8.4 Referencias y bibliografía recomendada

8.1. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE ACI 318R - 14. Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural, Farmington Hills, ACI, 2014.

8.2. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE - ACI 211.1.91. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. Detroit, Mich., 2001.

8.3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Concrete and Mineral Aggregates Part. 4, Easton, ASTM, 2005.

8.4. ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA - AIS. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR - 10. Bogotá, AIS, 2012.

8.5. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN - ICONTEC. Normas Técnicas Colombianas para la Construcción. Bogotá, ICONTEC, NTC 174 Y NTC 92.

8.6. INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO y SOLINGRAL. Manual de Dosificación de Mezclas de Concreto. Medellín, ICPC, 1979.

8.7. INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO - IMCYC. Práctica Recomendable para Dosificar Concreto Normal y Pesado. México, IMCYC, 1980.

8.8. MALLANA, R. Fundamentos de Concreto Aplicados a la Construcción, Bogotá, ICPC, 2007.

8.9. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION - PCA. Diseño y Control de Mezclas de Concreto.

8.10. SANDINO, A. Materiales para Estructuras. Bogotá, Escuela Colombiana de Ingeniería, 1981. Primera Edición. México, IMCYC - 2004.

9

Concretos con propiedades especiales



Los concretos especiales abarcan una gran variedad de concretos que tienen mayores exigencias que los concretos normales, entre estas, alta resistencia, durabilidad, o condiciones diferenciadas para el proceso de colocación.

Tal como se mencionó en el Capítulo 1, la tendencia de la ingeniería es a una mayor exigencia del concreto. Esto ha llevado a que se desarrollen mezclas con propiedades poco comunes o con técnicas fuera de lo ordinario, ayudado con el avance que se tiene de los materiales como los aditivos, los agregados y los materiales cementantes suplementarios, principalmente. Es así como han venido progresando los denominados concretos con propiedades especiales, que en muchos casos han sido patentados por la investigación y el uso exclusivo de determinados materiales o técnicas.

En este capítulo se tratarán los conceptos más importantes de algunos de los concretos especiales como el de alto desempeño, el concreto compactado con rodillo o CCR, el concreto lanzado, el concreto permeable (poroso), concreto de alta densidad y el concreto para el sistema 3D; entre otros. Uno de los concretos que se trata con más detalle y que es el objeto del siguiente capítulo, es el concreto con agregado liviano, dado su avance y versatilidad en la construcción moderna.

9.1 Concreto de alto desempeño

El concreto de alto desempeño se ha venido desarrollando durante los últimos años como producto de las mayores exigencias al concreto, en especial a la durabilidad. Anteriormente se denominaba Concreto de Alta Resistencia, pero en muchos casos priman otros aspectos como la resistencia a ataques químicos tales como sulfatos, cloruros y carbonatación, razón por la que el concepto ha cam-

biado. Además, como se ha venido mencionando, el incremento en la resistencia mecánica conlleva a un mejor desempeño en las otras características.

Por su parte, el término “Alta Resistencia” también ha cambiado. Hasta hace algunos años se consideraba como alta resistencia aquella que superaba los 35 MPa (5.000 psi) a los 28 días, luego a los 60 MPa (8.500 psi), y actualmente algunos la consideran cuando es superior a los 70 MPa (10.000 psi), valor en el que coincide la mayoría.

9.1.1 Materiales usados

Para la elaboración del concreto de alto desempeño se emplean materiales normales y especiales. Las siguientes son sus principales características.

Los agregados empleados son comunes, pero de buena calidad, bien gradados, limpios, resistentes, procedentes de trituración, con aristas y textura rugosa. Los tamaños que han demostrado producir las mayores resistencias son los que tienen un TMN entre 9,5 y 12,5 mm ($\frac{3}{8}$ " y $\frac{1}{2}$ ").

El cemento Tipo 1 es adecuado, pero cuando se requieran altas resistencias iniciales, el de alta resistencia temprana, el ART o el Tipo 3 son los indicados. El contenido puede variar entre 350 y 550 kg/m³. También son importantes las resistencias que pueda

desarrollar el cemento a edades entre 56 y 90 días, prefiriéndose éste último. Para un concreto de alta resistencia, el cemento debe desarrollar una resistencia mínima a 7 días de 31 MPa, medida en cubos de mortero normalizado.

Los materiales cementantes suplementarios tales como el metacaolín, la microsílíce, la escoria granulada de alto horno son prácticamente de uso obligatorio, pues el desarrollo de alta resistencia y la durabilidad a las diferentes acciones no se pueden lograr sólo con el cemento. Las dosis de estos materiales varían entre 5% y 20%, o más, por peso de cemento (ppc). La microsílíce y el metacaolín se emplean en cuantías entre 5% y 10% ppc, aunque en ocasiones podrían llegar hasta el 15%, siendo indispensable el uso de un aditivo superplastificante, para lograr una adecuada manejabilidad. Se debe determinar mediante pruebas que los materiales cementantes suplementarios contribuyen de manera efectiva a la resistencia, durabilidad y estabilidad de volumen del concreto producido.

El superplastificante debe ser compatible con el cemento y los materiales cementantes suplementarios, de manera que permita colocar el concreto por medios convencionales. También es necesario el empleo de otros aditivos como retardantes de fraguado, dependiendo de las circunstancias específicas.

El agua debe cumplir con los mismos requerimientos de calidad que para un concreto normal. Su cuantía varía entre 120 y 140 kg/m³ y la relación a/mc, generalmente, está entre 0,2 y 0,35. Los valores de asentamiento pueden estar entre 100 y 120 mm, aunque en ocasiones puede llegar a ser hasta de 200 mm. Cuando las mezclas son muy fluidas, la manejabilidad se mide por medio del ensayo de extensión (*Slump flow*).

9.1.2 Dosificación

Aun no se ha desarrollado una metodología generalizada para seleccionar los constituyentes de las mezclas de concreto de alto desempeño. La mejor orientación es elaborar las mezclas de prueba, usando los materiales específicos del proyecto, y la comprobación del logro de las propiedades requeridas.

Las Tablas 9.1, 9.2 y 9.3 muestran algunas dosificaciones de concretos de alto desempeño elaboradas para obras específicas.

Tabla 9.1. Materiales cementantes y relación grava/arena (9.17)

Diseños	Burj Dubai, UAE	Freedom Tower, NY	Wachovia Tower, Baltimore	Carnegie 57 Tower, NY
Material ligante (kg)	485	515	621	561
Humo de sílice (%)	12	8	18	15
Ceniza (%)	15	21	32	31
Relación G/A (% peso)	50/50	55/45	63/36	66/33

Tabla 9.2. Aditivos usados para producción de concretos de alto desempeño para las obras mostradas (9.17)

Diseños	Burj Dubai, UAE	Freedom Tower, NY	Wachovia Tower, Baltimore	Carnegie 57 Tower, NY
Reductor de agua de alto poder Tipo F (l)	3,69	1,99	4,77	3,98
Retardante - Reductor de agua Tipo D (l)	-	0,85	0,9	0,51
Controlador de hidratación del cemento Tipo S (l)	-	-	1,19	-

Tabla 9.3. Resistencia del concreto alcanzadas (9.17)

Diseños	Burj Dubai, UAE	Freedom Tower, NY
Contenido de aire	1,50%	2,00%
Resistencia a la compresión especificada (MPa)	80	98
Resistencia promedio alcanzada (MPa)	91	113

9.1.3 Mezclado, colocación y curado

Los concretos de alto desempeño pueden requerir métodos especiales de mezclado, colocación y curado. Cuando no existan experiencias previas, lo ideal es hacer mezclas de prueba en un laboratorio y colocarlas en una maqueta, para optimizar o verificar los sistemas de dosificación, mezcla, transporte y colocación, que se van a utilizar.

Dado que las mezclas tienden a ser pegajosas y a acumularse en las aspas de la mezcladora, el proceso de mezclado se debe optimizar añadiendo y verificando en las mezclas de prueba el porcentaje de adición de cada material, en cada etapa del procedimiento de dosificación. Cuando se usan camiones mezcladores, la carga se debe reducir hasta el 90% de su capacidad. Es aconsejable una pronta descarga de la mezcla una vez llegue a la obra. También se debe evitar todo retraso y colocación así como cualquier adición de agua.

Colocada la mezcla, se debe compactar el concreto lo más rápido posible, con pequeños vibradores de alta frecuencia, para que penetre de modo adecuado entre la formaleta y el acero de refuerzo. Hay que tener presente que un sobre vibrado produce segregación y exudación; Hacer las mezclas de prueba en este proceso también es importante.

El acabado de la superficie del concreto también resulta difícil en ocasiones dado el carácter pegajoso de la mezcla, de modo que su método se debe determinar también mediante pruebas previas.

El curado de los concretos de alto desempeño reviste especial importancia, debiéndose realizar de manera rigurosa, inmediatamente haya fraguado, por medio de suministro permanente y suficiente humedad, manteniendo condiciones favorables de temperatura durante tiempos más prolongados, especialmente cuando las resistencias de diseño son a 56 ó 90 días. Se pueden requerir de hasta tres o más semanas de curado.

9.1.4 Propiedades

Hasta hace unas tres décadas, la atención de los concretos de alto desempeño estaba enfocada hacia los concretos de alta resistencia, sin embargo, en la actualidad se hace más énfasis en la durabilidad para tener estructuras con mayor vida útil, siendo esta la tendencia generalizada a nivel mundial.

La baja permeabilidad del concreto es uno de los factores claves para obtener alto desempeño, en

especial aquellos que se encuentran expuestos a la intemperie, toda vez que el concreto protege el acero de refuerzo evitando la entrada de agua, gases (como el CO_2), vapores y la penetración de cloruros y sulfatos, tal como se explicó en el Capítulo 7.

Adiciones tales como la microsílíce y el metacaolín, confieren alta resistencia a la abrasión y erosión, de modo que estructuras como vertederos, pavimentos rígidos, pisos industriales; entre otras, resultan beneficiadas con el uso de concretos de alto desempeño con adición de microsílíce.

Los concretos de alto desempeño, por su baja permeabilidad, evitan la entrada de CO_2 y de agua, razón por la que difícilmente se carbonata la estructura. Si la profundidad de carbonatación es tal que no llega hasta la posición del acero de refuerzo, no habrá corrosión.

Dadas las bajas relaciones a/mc, la reducida permeabilidad y la alta compacidad, los concretos de alto desempeño ofrecen mejores resistencias al ataque químico de los ácidos y los sulfatos, pues su penetración es más difícil.

Así mismo, la muy baja relación a/mc usada y la escasa permeabilidad obtenida, ayudan a evitar, en buena medida, el desarrollo de la reacción álcalis – sílice. Así mismo, el uso de materiales cementantes suplementarios como el metacaolín y otras puzolanas, mitigan la reacción entre la sílice activa de los agregados y los álcalis del cemento y aquellos que ingresan desde fuentes externas. Es importante la verificación de esta reacción mediante pruebas de laboratorio especializadas.

De otro lado, el concreto de alto desempeño, con una resistencia superior a los 120 MPa (17.000 psi) y con un contenido idóneo de fibras, cuenta con excelente resistencia a las explosiones, propiedad buscada por algunas estructuras como las militares, ciertas embajadas y cámaras de bancos.

Las Figuras 9.1 y 9.2, muestran el proyecto del nuevo puente Pumarejo en la ciudad de Barranquilla, donde la especificación del concreto de alto desempeño pretende lograr una durabilidad de 100 años. La obra requiere de la protección contra la penetración de cloruros, sulfatos, CO₂ y humedad entre otras y por ello incluyen el uso de metacaolín

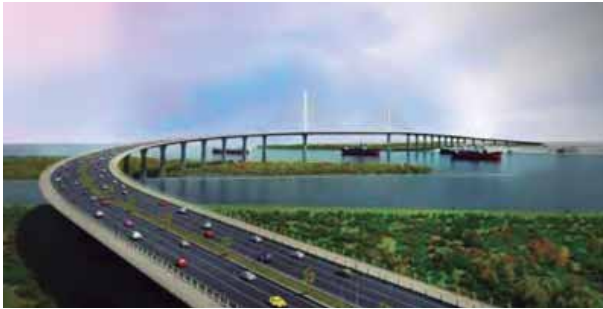


Figura 9.1. Esquema del nuevo puente Pumarejo
Fuente: Ministerio del Transporte



Figura 9.2. Proceso de construcción del puente Pumarejo.
Durabilidad especificada mayor de 100 años ‡

9.2 Concreto autocompactante

Como se definió en el Capítulo 6, el concreto autocompactante es una mezcla que, al colocarla, se acomoda en todos los espacios de la formaleta, embebe el acero y se compacta por la acción de su propio peso, sin necesidad de vibración, proveyendo a la estructura una superficie de terminado suave.

El concreto autocompactante fue desarrollado en Japón en los años 1980 y exige una producción con las mejores prácticas de control y de calidad, pues son mezclas particularmente sensibles a los ingredientes, a la humedad de los agregados y a la tasa de dosis de los aditivos.

La producción del concreto autocompactante requiere del empleo de aditivos reductores de agua de alto rango, en especial los base carboxilatos, que proveen alta fluidez, con poca agua, sin comprometer la resistencia o la durabilidad.

9.2.1 Ventajas del uso de concreto autocompactante

Entre otras, se destacan las siguientes:

- Mayor rapidez en la colocación, con el consecuente ahorro de tiempo y dinero.
- No se requiere equipo ni cuadrilla de compactación, lo que significa economía en vibradores y mano de obra calificada.
- Los acabados de la superficie permiten elaborar concretos arquitectónicos, con poca o ninguna reparación.
- Permite la colocación del concreto en estructuras con mucho refuerzo o de secciones muy restringidas, imposible de lograr con el concreto convencional.
- La autocompactación, prácticamente, garantiza que el acero de refuerzo quede embebido en el concreto, y su efectiva adherencia.
- El proceso de bombeo es más fácil y rápido.
- Se disminuye la posibilidad de segregación y exudación, pues se obtienen mezclas más cohesivas.
- Los tiempos de viaje de los camiones de concreto son menores, permitiendo

al productor mayor eficiencia en el movimiento de su equipo (camiones y bombas) durante la colocación.

9.2.2 Aplicaciones

La versatilidad y eficiencia del concreto autocompactante es tal, que se puede aplicar en todos los segmentos de la construcción con concreto: prefabricación, acabados arquitectónicos, obra civil, edificación y concreto bombeado (Figura 9.3).



Figura 9.3. Algunas aplicaciones del concreto autocompactante

Box cuolvert prefabricado realizado con concreto autocompactante (Cortesía de Constructora Conconcreto)

9.2.3 Aspectos de diseño, producción y colocación

En general, el concreto autocompactante contiene mayor cantidad de finos, de materiales cementantes y de pasta que el concreto convencional, aunque se debe tener cuidado pues el diseño con alto contenido de pasta o de finos puede presentar incrementos en la contracción. Los agregados deben ser muy bien gradados para evitar la segregación y la exudación. El TMN puede ser de 38 mm o menores y el contenido de agregado grueso es menor que un concreto convencional. Un ejemplo de dosificación del volumen absoluto de los materiales usados en el concreto autocompactante, es la siguiente:

- Cemento: 10%.
- Agua: 18%.
- Aire (atrapado): 2%.
- Cementantes complementarios como: (puzolanas, metacaolín, escorias): 8%.
- Agregado fino: 26%.
- Agregado grueso: 36%.

En el concreto autocompactante se debe evitar el transporte de la mezcla por largas distancias, las altas temperaturas y las demoras en la obra, pues se disminuye su fluidez perdiendo sus ventajas. Así mismo, los mixer no se deben llenar a su capacidad total para evitar los derrames, aunque la mezcla se puede transportar con menor fluidez y ajustarla a la llegada a la obra.

Se debe evitar o minimizar los bloqueos durante el bombeo y en la colocación de sitios restringidos. Las formaletas se deben diseñar para que resistan una mayor presión, al tiempo que sean herméticas. Una vez colocada la mezcla, no se debe presentar exudación, segregación ni asentamiento plástico excesivo.

9.2.4 Métodos de prueba

Los métodos de prueba usados, para medir la manejabilidad del concreto autocompactante, son la caja en L, el anillo J, y el Slump Flow o el de flujo o extensión, cuyos procedimientos se estudiaron en el Capítulo 7. De las mencionadas, la más empleada es el de la prueba de flujo con la que, además de la fluidez, se puede medir la viscosidad.

Como se vio, la fluidez es la medida del desplazamiento de la muestra de concreto luego de hacer el ensayo de asentamiento con el cono de Abrams (Figura 9.4). La resistencia a la segregación se mide observando que no haya agua exudada en el borde y que los agregados no se amontonen en el centro.



Figura 9.4. Prueba "Slump Flow" o de Flujo

La viscosidad de la mezcla se mide tomando el tiempo que tarda el concreto en extenderse 500 mm (20"), desde el momento que se levanta el cono, medida que se denomina como T50, y típicamente varía entre 2 y 10 segundos.

9.3 Concreto compactado con rodillo - CCR

El concreto compactado con rodillo, mejor conocido como CCR, es un concreto con bajo contenido de cemento, muy seco y de asentamiento cero, que se compacta a través de rodillos vibratorios.



Figura 9.5. Aspecto y compactación del CCR con rodillo vibratorio Obra Porce II
(Constructora Conconcreto-Coninsa y Camargo Correa)

9.3.1 Características generales de la mezcla

Además del cemento, agregados y agua, también se emplean con frecuencia cenizas volantes, metacaolín, humo de sílice, entre otras puzolanas, al igual que aditivos.

Los contenidos de cemento pueden variar entre 60 y 360 kg/m³.

En general, el mezclado se realiza de manera convencional. El requerimiento del agua es muy pequeño y normalmente la humedad de los agregados puede ser suficiente.

En estado fresco, la mezcla debe tener la capacidad de soportar un rodillo vibratorio para su proceso de compactación.

Su transporte, manejo, colocación y compactación, se hace utilizando equipos de construcción, para movimiento de tierras, es decir,

transporte mediante camiones, extendida con buldócer o máquina niveladora, y compactación con compactadores vibratorios (Figuras 9.5 a 9.7).

Las propiedades del CCR endurecido, son similares a las de un concreto convencional. El curado, luego de la compactación, es clave por tratarse de mezclas muy secas. Se puede realizar mediante rocío continuo de agua, plásticos o curadores.

Se puede lograr CCR con alta resistencia a los impactos y elevadas resistencias a las cargas abrasivas, con la optimización de las granulometrías de los agregados y la adición de ciertas puzolanas.



Figura 9.6. Transporte, manejo, colocación y compactación del CCR en preatagüa del proyecto hidroeléctrico Ituangó
(Cortesía Constructora Conconcreto)

La construcción con CCR exige la colocación del concreto mediante múltiples capas, por lo que la unión entre ellas puede constituir en un punto débil al paso del agua y la resistencia a la flexión. Por ello, es muy importante conocer los tiempos de fraguado, que se encuentran estrechamente relacionados con la evolución de la capacidad de adherencia entre capas.

Cuando la capa subyacente no ha fraguado y sobre ella se coloca otra, se forma lo que se denomina la junta caliente, caso en el que no se requiere de mortero de adherencia. Cuando el concreto de la capa subyacente ya fraguó (junta intermedia) o cuando ya endureció (junta fría), es necesario asegurar la adherencia entre capas usando mortero de junta, con un espesor de 1 cm y un asentamiento entre 260 y 280 mm.

9.3.2 Aplicaciones

El CCR tiene dos aplicaciones básicas: presas (estructuras de control de agua) y pavimentos rígidos, que difieren en el diseño y los procesos de construcción. También se aplica a la técnica del suelo cemento o suelo estabilizado con cemento, que es una mezcla en seco de suelo o tierra con determinadas características granulométricas, cemento y, eventualmente, aditivos. A la mezcla se le coloca agua para el fraguado y posteriormente se compacta con rodillos vibratorios.

CCR aplicado a presas (estructuras de control de agua)

Los siguientes aspectos resumen esta aplicación:

- El CCR se puede usar para toda la presa o como capa de protección sobre la sección superior.
- El TMN del agregado puede ser hasta de 150 mm (6").
- La mezcla se puede transportar por medio de camiones, bandas transportadoras o por camión mezclador.
- Las resistencias obtenidas pueden variar entre 7 y 32 MPa (70 y 320 kg/cm²).
- Se coloca en capas entre 150 y 450 mm de espesor cada una.

CCR aplicado a pavimentos rígidos

- Los espesores de los pavimentos pueden variar desde los 120 mm para calles urbanas, hasta 1 m para vías de minería.
- El contenido de cemento varía entre 300 y 360 kg/m³.
- La resistencia a la compresión varía entre 28 y 42 MPa (280 y 420 kg/cm²).

- El TMN se limita a 19 mm (3/4"). Para superficies más tersas, se puede limitar a 16 mm (5/8").
- La colocación se hace normalmente en capas cuyo espesor puede variar entre 120 y 250 mm, empleando maquinaria similar a la usada para extender asfalto (motoniveladora, *finisher*, entre otras).



Figura 9.7. Rodillo vibratorio aplicado a suelo cemento

9.3.3 Materiales requeridos para la producción de CCR

Dentro del proceso constructivo con CCR y la producción misma del material, pueden requerir diversos productos para asegurar las propiedades buscadas, como aditivos químicos, puzolanas, mejoradores de adherencia y curadores, que ayudan, entre otras, a lograr las siguientes propiedades:

- Reducir la cantidad de cemento manteniendo las resistencias mecánicas.
- Aumentar las resistencias mecánicas sin incremento de la cantidad de cemento.
- Producir mezclas de CCR altamente resistentes al impacto y a la abrasión.
- Extender los límites permisibles para obtener una junta caliente, disminuyendo o eliminando el mortero de pega.
- Lograr mayor tiempo de trabajabilidad.
- Reducir el máximo valor de temperatura inicial y la tasa de generación de calor en la estructura.

En particular, los aditivos pueden ayudar a mejorar la densidad del concreto y, en consecuencia, la resistencia. También pueden ayudar a obtener más pronto el grado de compactación, traducido en menor tiempo para esta operación, uso de menos energía,

menor desgaste de equipo, mayor rapidez en la construcción, lo que redundará en mayor economía. Las puzolanas proporcionan alta resistencia mecánica y química, densifican y reducen la permeabilidad.

Es de recordar, que el uso de cualquier producto requiere de pruebas previas con los materiales que se emplearán en la obra, para optimizar las propiedades.

9.3.4 CCR en Colombia

La mayor experiencia en Colombia en construcción en CCR, se encuentra en presas para hidroeléctricas, siendo las obras más representativas las de Porce II en Antioquia (Figura 9.8) e Hidromiel en Caldas; hay otros proyectos que contemplan su diseño con este tipo de concreto. En lo que respecta a pavimentos, hay varias compañías productoras de concreto y constructoras que quieren impulsar el CCR como alternativa.



Figura 9.8. Presa de la central hidroeléctrica de Porce II

Arriba: Cara de aguas abajo. Abajo:Detalle de la captación
(Cortesía de Constructora Conconcreto)

9.4 Concreto Tremie

El concreto Tremie es una mezcla especialmente diseñada para colocar el concreto, mediante el sistema que lleva el mismo nombre. Es tal vez el sistema de colocación especializado más empleado para vaciados de concreto bajo agua o en profundidades entre 1,5 m y 50 m, tales como pilotes elaborados in situ, pantallas de protección muy delgadas o esbeltas y la construcción de estructuras bajo agua.

La mezcla del concreto Tremie requiere de unas características especiales, logradas a través de los materiales. En esta sección se describe el funcionamiento general del sistema, las propiedades de los materiales comúnmente empleados, las características de la mezcla y algunas recomendaciones para la operación.

9.4.1 Características generales del sistema

El sistema de colocación Tremie consiste en una tolva en forma de embudo que recibe el concreto, acoplada a un sistema de tubería metálica provista de juntas herméticas, que llega hasta el fondo de la formaleta del elemento que se fundirá (Figura 9.9). Los diámetros de la tubería pueden ser de 100 mm, 200 mm o 300 mm, teniendo presente que los diámetros pequeños pueden causar bloqueos en la tubería.

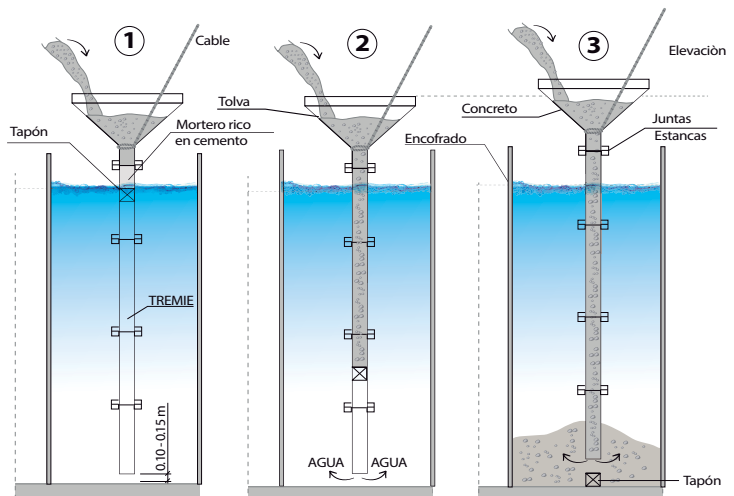


Figura 9.9. Esquema general y funcionamiento del sistema Tremie*

La operación de colocación se parece, en algunos aspectos, a la de bombeo, tan solo que el flujo se presenta por acción de la gravedad. La maniobra comienza apoyando el tubo en el fondo, para evitar que el concreto se contamine o se lave con el agua. Se coloca un tapón en la boca del embudo generalmente una pelota o globo de goma inflado, de modo que el concreto lo empuja hasta el fondo, pudiéndose recuperar posteriormente cuando sale a la superficie. Una vez llena la tubería con el concreto, se levanta el tubo entre 10 y 15 cm, para permitir que el concreto fluya, teniendo cuidado de no sacar el extremo inferior del tubo de la mezcla. Durante la operación de vaciado, el extremo inferior del tubo se debe mantener entre 0,90 y 1,50 m, por debajo de la superficie del concreto. Dado que es imposible tener una inspección visual del proceso de vaciado, la operación se controla observando el volumen de concreto colocado y la altura alcanzada en el tubo. La carga de la mezcla en el embudo debe ser suave para evitar que se incorpore aire al sistema.

Se debe evitar que el tubo se mueva horizontalmente mientras fluye el concreto, puesto que causa daños en la superficie de la mezcla colocada, crea lechadas adicionales y, eventualmente, una pérdida del sellado. Se requiere que el proceso de colocación sea continuo, hasta completar la estructura (Figura 9.10).



Figura 9.10. Foto de concreto Tremie
Cortesía: Juan Diego Londoño

9.4.2 Características generales de la mezcla

El concreto debe ser muy fluido y cohesivo. Generalmente se diseñan y producen con un asentamiento entre 150 y 250 mm, dependiendo del diámetro de la tubería usada, la dimensión del elemento que se va a fundir y la cantidad y disposición del acero de refuerzo (Figura 9.11). Es recomendable que, en la

medida que la tubería sea de menor diámetro, el concreto sea más fluido.



Figura 9.11. Colocación del refuerzo de un pilote a ser fundido con el sistema Tremie

Se recomienda que las mezclas sean ricas en contenidos de material cementante, superiores a los 350 kg/m³ de concreto, que contenga alrededor del 15% de puzolanas o de material fino que ayude a la manejabilidad y le dé fluidez. Se debe tener cuidado con el uso de cuantías de cemento muy altas, pues se ha encontrado que en elementos grandes se pueden generar, en el centro, temperaturas superiores a los 70°C, con la consecuente generación de grietas durante el enfriamiento y formación de etringita secundaria. El uso de cemento y de materiales cementantes suplementarios, puede mitigar el calor de hidratación presentado. También se puede enfriar la mezcla usando agregados previamente enfriados o que se encuentran a bajas temperaturas, y el uso de agua fría o en forma de escarcha (hielo). La cuantía y disposición del acero de refuerzo ayudan al control de la retracción.

La relación a/mc , usualmente empleada está entre 0,40 y 0,45, siendo necesario el uso de un aditivo reductor de agua de alto rango, que proporcione la fluidez requerida.

9.4.3 Características generales de los materiales

Agregados

Se recomiendan los de forma redondeada y textura lisa, para ayudar a la manejabilidad. El TMN puede ser de hasta 38 mm, (1 1/2") en estructuras sin refuerzo, y de hasta 19 mm, (3/4") para estructuras reforzadas. Deben ser bien gradados, especialmente la arena, recomendándose una buena cantidad (entre

45 % y 55 % del volumen total) que facilite la manejabilidad y un terminado adecuado.

Cemento

Como se mencionó, se recomienda que su dosificación sea como mínimo de 350 kg/m³ de concreto, y aumentarse en un 25% respecto de la mezcla convencional, con el fin de no comprometer la resistencia ni la durabilidad. El uso de los materiales cementantes suplementarios, además de ayudar a la manejabilidad, disminuye la permeabilidad y beneficia la resistencia y la durabilidad.

Aditivos

Los aditivos contra el arrastre son efectivos, pues hacen que el concreto fluya cuando se mueve, pero su viscosidad aumenta cuando está en reposo. Los reductores de agua de alto rango o superplastificantes, actúan en beneficio de las mezclas en pro de la cohesividad y de la manejabilidad.

9.4.4 Recomendaciones para la operación

Los siguientes aspectos resumen las recomendaciones para llevar a cabo la fundida mediante el sistema Tremie, aclarando que se trata de una operación delicada, que si no se realiza correctamente, puede traer consecuencias serias para la estructura.

- La colocación debe ser tan continua como sea posible.
- Los intervalos largos facilitan el endurecimiento de la mezcla, dificultan su fluencia y la operación en general.
- Interrupciones hasta de 30 minutos, permiten continuar las operaciones sin mayores dificultades. Para lapsos mayores se debe retirar, resellar y reiniciar la operación. De ser posible, se aconseja el uso de aditivos retardantes, evitando así las juntas frías.
- Cuando se requiera fundir estructuras alargadas, los tubos se deben espaciar de modo que el concreto no tenga que desplazarse demasiado horizontalmente, pues se puede segregarse la superficie que está en contacto con el agua, especialmente en concretos pobres, con relación a/mc alta.
- La separación usual está comprendida entre 4,5 y 10,5 m.
- En lo posible, no usar tuberías de aluminio, pues reaccionan con algunos componentes del cemento, generando hidrógeno, que en últimas es aire en la mezcla con la consecuente pérdida de resistencia.

- Programar la operación para que sea continua.
- Emplear mano de obra calificada, con suficiente experiencia.
- Terminada la operación, efectuar la limpieza del equipo.

9.5 Concreto bombeado

El concreto bombeado es uno de los más usados, gracias a su versatilidad, facilidad de manejo y economía. La acción de bombear el concreto, más que un tipo de concreto, es un sistema de transporte y colocación, no obstante, la mezcla debe tener unas características determinadas que permita realizar el proceso.

En esta sección se estudian las propiedades generales de la mezcla que permiten su bombeo, y las ventajas del sistema. En el Capítulo 11 se presentarán sus características generales y las recomendaciones para que la operación sea exitosa.

9.5.1 Características generales de la mezcla

En general, la mezcla debe tener las siguientes características:

- No ser áspera ni pegajosa.
- La consistencia del concreto debe ser adecuada, dependiendo de la obra, del equipo de compactación y la distancia de transporte (Figura 9.12). La manejabilidad debe tener un asentamiento mínimo de 100 mm, requiriendo de un aditivo plastificante.



Figura 9.12. Consistencia de la mezcla de un concreto bombeado †

- El ACI 304 recomienda que El TMN del agregado grueso no sea mayor de 1/4 del diámetro interno de la tubería, cuando el agregado tiene forma irregular (procedente de trituración); ni de 1/3 del diámetro interno de la tubería, cuando la forma de los granos es aproximadamente redondeada (canto rodado).
- El ACI 304.2R - 91 recomienda la granulometría de los agregados mostrados en la Tabla 9.4.
- La mezcla tiene un diseño especial que reduce el riesgo de segregación.



Figura 9.13. Colocación de concreto bombeado en punto de difícil acceso †

Tabla 9.4 Granulometría recomendada por el ACI 304 para concreto bombeado (9.7)

Tamiz, mm	% Pasa	
	TMN de 25 mm	TMN de 19 mm
25	100	-
19	80 a 88	100
12,5	64 a 75	75 a 82
9,5	55 a 70	61 a 72
4,75	40 a 58	40 a 58
2,36	28 a 47	28 a 47
1,18	18 a 35	18 a 35
0,600	12 a 25	12 a 25
0,300	7 a 14	7 a 14
0,150	3 a 18	3 a 8
0,075	0	0

9.5.2 Ventajas del concreto bombeado

En general, el uso de concreto bombeado en la construcción, presenta las siguientes ventajas:

- Se pueden colocar altos volúmenes de concreto.
- Es adecuado para obras con espacios reducidos.
- Permite organizar los sistemas de transporte y distribución del concreto en obra.
- Permite la llegada a puntos de difícil acceso (Figura 9.13).
- El material llega directamente de la mezcladora a la formaleta, evitando doble manejo.
- La colocación se puede ejecutar a la velocidad de descarga de la mezcladora, sin interrupciones debidas a las limitaciones de transporte y el equipo de colocación.

9.6 Concreto permeable o poroso

El concreto permeable, poroso, o concreto sin finos (nombre original en inglés: "pervious concrete"), es un compuesto de cemento agregado grueso, agua y aditivos, que al mezclarse sirve para fabricar pisos y pavimentos totalmente permeables.

La poca presencia de agregado fino hace que el concreto tenga una estructura porosa, permitiendo que el agua pase a través de su espesor, disminuyendo la escorrentía superficial, ante eventos de lluvia copiosa (Figura 9.14).



Figura 9.14. Concreto poroso †

Dada la dificultad que presenta durante la colocación este concreto, se han desarrollado procesos que ayuden a su producción, colocación y nivelación.

9.6.1 Ventajas del uso concretos permeables Algunas son las siguientes:

- Se eliminan los charcos, y con ello el hidroplaneo de los vehículos, haciendo más segura la vía.
- Se disminuye apreciablemente el ruido del motor de los vehículos, y con ella la contaminación auditiva.
- Permite la optimización de los drenajes pluviales, eliminándolos en ocasiones.
- Adquiere su resistencia de trabajo entre 24h y 72h, pudiendo ponerse al servicio más pronto.
- Permite hacer concretos con diferentes colores y con distintos tipos de agregados, logrando estructuras armoniosas y agradables.
- Se puede elaborar tanto en obra como en plantas de concreto premezclado.
- Su costo es reducido y bastante competitivo.
- Reduce la temperatura de la superficie disminuyendo el efecto de "isla de calor urbano".
- Permite lograr puntos en la certificaciones de construcción sostenible, por ejemplo LEED.
- Reduce los picos de caudal de escorrentía, generados por el agua lluvia en áreas urbanas, que son generalmente impermeables.
- Ayuda a mejorar la recarga del agua subterránea y al crecimiento de árboles y vegetación, al tiempo que favorece la aireación del suelo.

9.6.2 Aplicaciones

La tecnología del material es adecuada para andenes, parqueaderos, plazoletas peatonales, áreas de drenaje, patios y malecones; entre otros.

9.6.3 Características de la mezcla

Dado que el concreto poroso requiere de relaciones a/mc bajas (entre 0,25 y 0,32), es necesaria la ayuda de aditivos reductores de agua de medio y alto rango. También es necesario el uso de aditivos modificadores de viscosidad, que ayudan a la pasta a permanecer adheridas a los agregados; esto se debe a que en las mezclas de concreto permeable, la pasta de cemento tiende a irse al fondo, fenómeno conocido como "lavado". El efecto de estos aditivos hace que la pasta quede adherida a la superficie de los agregados, ayudando a mantener la integridad de la estructura de vacíos (Figura 9.15).



Figura 9.15. Aspecto del concreto poroso en estado fresco †

El concreto permeable es de bajo contenido de agua y alta estructura de vacíos, lo que permite un mejor acceso de la pasta, teniendo algunas veces a que las partículas de cemento se hidraten muy rápido y se reduzca el tiempo de colocación. Los aditivos de control de hidratación disminuyen este efecto de manera notoria, extendiendo el tiempo de manejabilidad aun en climas severos.

9.6.4 Aspectos de diseño

El concreto permeable es muy dependiente del diseño de mezcla. Tiene una estructura de vacíos que varía entre el 15% y 25%. La gradación de los agregados es uno de los elementos claves, así como su limpieza. Generalmente se emplea grava redondeada (canto rodado) de 9,5 mm (3/8").

La cuantía de cemento varía entre 300 y 385 kg/m^3 . La cantidad de agua debe ser tal, que guarde una relación a/c , tan baja como sea posible (entre 0,25 y 0,32), de modo que se mantenga la estructura de vacíos. La escogencia de los aditivos antes mencionados son claves para la producción, manejo, colocación y nivelación del concreto poroso. Las Tablas 9.5 y 9.6, dan una idea acerca de las cuantías de materiales en una mezcla de concreto permeable y de las resistencias obtenidas, respectivamente.

Tabla 9.5. Contenidos aproximados de los materiales en las mezclas (9.20)

Material	kg/m ³
Cemento	356
Agregado grueso de 9,5 mm	1543
Agua	95
Relación a/c	0,27
Aditivos	ml/100 kg
Superplastificante	160
De control de hidratación	260
Modificador de viscosidad	520

Tabla 9.6. Propiedades típicas que se pueden alcanzar con el concreto permeable (9.20)

Propiedades en estado plástico	kg/m ³ ^A
Densidad	1900 - 2000
Contenido de vacíos	25 a 30%
Resistencia ^B	MPa
Compresión a 7 días	10 a 14
Compresión a 28 días	12 a 20
Flexión a 28 días	3 a 4

^A Deben ser corroboradas mediante pruebas de laboratorio
^B Las resistencias a la compresión se pueden incrementar con el ajuste del diseño de mezcla, pero esto puede afectar negativamente el contenido de vacíos.

9.7 Concreto lanzado

El concreto lanzado, desarrollado hacia 1911, también conocido como gunitado, proyectado o shotcrete. El concreto lanzado es hecho con agregado pequeño, y arrojado contra una superficie a través de una manguera, mediante aire comprimido que le imprime alta velocidad.

El diseño de la mezcla y la fuerza de impacto hace que la mezcla no se desprenda, pudiéndose aplicar en todo tipo de superficies: horizontales, verticales, inclinadas y sobre-cabeza (techos).

9.7.1 Características de la mezcla

Las propiedades del concreto lanzado son muy similares a las del concreto convencional. Se trata de una mezcla relativamente seca, que se puede colocar mediante dos procesos: seco y húmedo. Para el primero, se hace una mezcla del cemento con los agregados húmedos, se proyecta con aire comprimido a través de una manguera hasta la boquilla en donde se le adiciona el agua, lanzándose los ingredientes íntimamente mezclados contra la superficie. La relación a/mc mediante este proceso varía entre 0,30 y 0,50.

En el proceso por vía húmeda, todos los materiales son mezclados previamente, para luego ser lanzados a través de la boquilla. Este proceso es el más utilizado actualmente, toda vez que se tiene un mejor control sobre la cuantía de agua adicionada y de los aditivos; además produce menos polvo, menos rebote y permite la producción de grandes volúmenes. La relación a/mc mediante este proceso varía entre 0,4 y 0,55.

Debido a la alta velocidad con la que golpea la mezcla la superficie, una parte del material rebota, especialmente los agregados más gruesos. Esto hace que los concretos lanzados requieran de un incremento en la dosis de cemento, lo que conlleva a mayor riesgo de contracción y fisuración. En la Tabla 9.7, se muestran algunos porcentajes típicos de rebote.

Tabla 9.7. Porcentajes típicos de rebote del concreto lanzado (9.19)

Estructura	Proceso usado de lanzado	
	Seco, % rebote	Húmedo, % rebote
Pisos y losas	5 a 15	0 a 5
Superficies inclinadas o verticales	15 a 30	5 a 10
Techos o superficies sobrecabeza	25 a 50	10 a 20

La cantidad de rebote disminuye en la medida que haya suficiente pasta para proveer una cama donde el agregado se pueda adherir. También es importante que durante la aplicación, la boquilla y la superficie formen un ángulo de 90° y la distancia entre las dos esté entre 0,5 y 1,5 m, dependiendo de la velocidad de proyección. La Figura 9.16 ilustra la aplicación.



Figura 9.16. Aplicación del concreto lanzado
Colocación de concreto lanzado en obra Hidroituango
Cortesía Constructora Conconcreto-Coninsa-Camargo Correa

Uno de los principales problemas del material de rebote, es su acumulación en los sitios donde se lanzará luego concreto, especialmente en las esquinas de los muros, en superficies horizontales, detrás del refuerzo o de los elementos embebidos.

9.7.2 Características de los materiales

Agregados

El tamaño máximo del agregado grueso puede ser de hasta 19 mm (3/4”), aunque la mayoría de mezclas contienen tamaños de hasta 9,5 mm (3/8”). En mezclas húmedas se usan generalmente entre el 25% y el 30% de grava. Las granulometrías recomendadas se muestran en la Tabla 9.8.

Tabla 9.8. Granulometrías recomendadas de agregados para concreto lanzado (9.19)

Tamiz, mm	% Pasa		
	Granulometría		
	N° 1	N° 2	N° 3
19	-	-	100
12,5	-	100	80 a 95
9,5	100	90 a 100	70 a 90
4,75	95 a 100	70 a 85	50 a 70
2,40	80 a 100	50 a 70	35 a 55
1,20	50 a 85	35 a 55	20 a 40
600	25 a 60	20 a 35	10 a 30
300	10 a 30	8 a 20	5 a 17
150	2 a 10	2 a 10	2 a 10

Materiales cementantes

Los cementos usados para el concreto lanzado son los mismos de los concretos convencionales, aunque también se pueden emplear materiales cementantes suplementarios, que mejoran la trabajabilidad, la resistencia y la durabilidad, al tiempo que disminuyen la permeabilidad al densificar la mezcla y formar productos de hidratación. La inclusión entre 10% y 15% de microsílíce o metacaolín, mejora la cohesión y disminuye el rebote.

Aditivos

El uso de aditivos acelerantes permite la aplicación de capas gruesas (> 100 mm) en una sola pasada, pero aumenta la contracción por secado y reduce la resistencia a edades posteriores a 28 días.

Es muy común incluirle hasta el 2% de fibras de acero, para mejorar la resistencia a la flexión, la ductilidad y la tenacidad; también pueden reemplazar la malla electrosoldada. Las fibras sintéticas (polipropileno) agregadas entre 1 y 2,8 kg/m³, disminuyen la fisuración por contracción plástica y también pueden reemplazar la malla, aunque en ciertos casos se ha incluido hasta 9 kg/m³.

9.7.3 Aplicaciones

El concreto lanzado es muy usado en estructuras curvas, estructuras delgadas y en reparaciones superficiales. Las principales aplicaciones del concreto lanzado están en el revestimiento de túneles, la elaboración in situ de secciones delgadas y ligeramente reforzadas, especialmente placas de revestimiento, reparación de estructuras, protección contra el fuego de estructuras metálicas, estabilización de taludes, y como recubrimientos de poco espesor sobre concreto, mampostería o acero.

El espesor de la aplicación del concreto lanzado se hace en capas de aproximadamente 100 mm, aunque con el uso de aditivos acelerantes de fraguado, se puede incrementar el espesor por medio de capas sucesivas.

La calidad de la aplicación del concreto lanzado depende, en gran medida, del operario. Por ello se recomienda que sea hecha con mano de obra calificada y experimentada. El capítulo ACI 506 R – 90, proporciona una completa guía donde se recomiendan todos los aspectos que atañen al concreto lanzado.

9.8 Concreto liviano

En general, el concreto liviano es un concreto similar al de peso normal, excepto que su densidad es menor. Para su producción se utilizan agregados livianos (arena y grava), o una combinación de agregados livianos y naturales, que cumplan con las normas NTC 4045 (ASTM C330) y 174 (ASTM C33), respectivamente.

El concreto liviano estructural tiene una densidad que varía entre 1.440 y 1.840 kg/m³ y una resistencia a la compresión que supera los 17 MPa (170 kg/cm² ó 2.500 psi). Su uso principal son losas de edificios altos para reducir la carga muerta. El concreto

liviano, en general, se usa como aislante térmico o acústico.

Los agregados livianos se pueden obtener de forma natural o industrial. Los naturales provienen del procesamiento, por ejemplo, de la piedra pómez o escorias naturales; mientras que los industriales, proceden del sometimiento a altas temperaturas de otros materiales naturales, como arcillas, pizarras y esquistos, que se expanden formando una red de poros.

El estudio, un poco más detallado, de los agregados y de las propiedades de los concretos livianos, se hace en el Capítulo 10.

9.9 Concreto de alta densidad o pesado

El concreto de alta densidad, es aquel cuya densidad, puede ser de hasta 6.400 kg/m³. En general, es aquel cuya densidad es mayor a 2.600 kg/m³.

Tal como se ha mencionado, el concreto de alta densidad se usa para la protección contra radiaciones perjudiciales como los rayos X, gamma y radiación de neutrones. También se usa para contrapesos, macizos de anclaje y contenedores de desechos radioactivos, entre otras.

9.9.1 Características de la mezcla

A excepción de la densidad, las propiedades del concreto de alta densidad son las mismas del concreto convencional de peso normal. La característica de la alta densidad se la dan los agregados.

Cuando el concreto se usa como blindaje, la densidad de diseño del concreto la determina el grado de protección requerido, es decir, a mayor densidad del concreto mayor blindaje. No obstante, la protección contra la radiación de neutrones requiere, además de elementos pesados, de elementos livianos con el fin de disminuir la velocidad de los neutrones rápidos y transformarlos en neutrones térmicos; en este caso se emplea el hidrógeno del agua adsorbida dentro de los agregados (agua fija), de modo que los agregados pesados con este tipo de agua en su estructura, son los adecuados.

En algunos casos, como las estructuras de generación de energía nuclear, al absorber la energía de radiación, la temperatura del concreto se incrementa de manera no uniforme, dependiendo de la distancia a la fuente de radiación. El diferencial de temperaturas origina esfuerzos de tensión internos, que si no son previstos, ocasionarán fisuras, agrietamientos y eventuales fallas.

Para el caso del uso en contrapesos, como los empleados en puentes colgantes (Figura 9.17), o los elementos usados como medio para hundir en el agua tuberías para el transporte de fluidos, la densidad requerida del concreto debe ser especificada por el ingeniero estructural. También se debe tener

en cuenta las características de durabilidad debidas a las acciones a que estará expuesto el concreto.

9.9.2 Características de los materiales

Los agregados de alta densidad para la producción de un concreto, pueden ser naturales o elaborados industrialmente (artificiales). Dentro de los naturales se encuentran la barita, la magnetita, la limonita y la hematita; entre otros. En los artificiales se destacan el fósforo de hierro (ferrofósforo), partículas de acero y limadura de hierro como subproducto industrial. La PCA elaboró la Tabla 9.9, que compila las propiedades físicas de los agregados y concretos típicos de alta densidad, que dan una idea de las densidades logradas en los concretos.

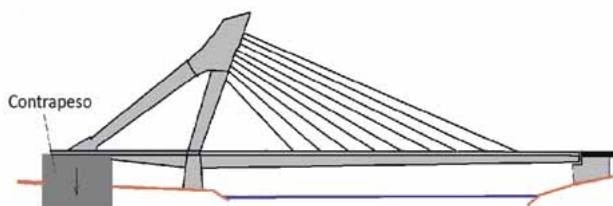


Figura 9.17. Esquema de macizos de anclaje para un puente colgante

Tabla 9.9. Propiedades físicas de agregados y concretos de alta densidad (9.20)

Tipo de agregado	Agua fija ^A , % en peso	Masa específica relativa del agregado	Masa volumétrica del agregado, kg/m ³	Masa volumétrica del concreto, kg/m ³
Geotita	10 a 11	3,4 a 3,7	2.080 a 2.240	2.880 a 3.200
Limonita ^B	8 a 9	3,4 a 4,0	2.080 a 2.400	2.880 a 3.360
Barita	0	4,0 a 4,6	2.320 a 2.560	3.360 a 3.680
Limenita	^C	4,3 a 4,8	2.560 a 2.700	3.520 a 3.850
Hematita	^C	4,9 a 5,3	2.880 a 3.200	3.850 a 4.170
Magnetita	^C	4,2 a 5,2	2.400 a 3.040	3.360 a 4.170
Ferrofósforo	0	5,8 a 6,8	3.200 a 4.160	4.080 a 5.290
Partículas de acero	0	6,2 a 7,8	3.860 a 4.650	4.650 a 6.090

^A Agua retenida, químicamente adherida a los agregados.

^B Sin datos de prueba disponible.

^C Los agregados se pueden combinar con limonita para producir contenidos fijos de agua que varían entre 0,5% y 5%.

Los agregados deben cumplir con las demás características exigidas a los de peso normal, como granulometría y limpieza. Así mismo, su escogencia dependerá del costo, disponibilidad y propiedades físicas.

Se puede emplear cualquier tipo de cemento comercial que sea compatible con los agregados y que aporte a los requisitos de resistencia y durabilidad exigidos al concreto. El uso de materiales cementantes secundarios resulta beneficioso para las características de la mezcla.

En cuanto a los aditivos, el boro resulta útil mejorando el blindaje contra los neutrones, pero se debe tener en cuenta su efecto en el tiempo de fraguado y la disminución en las resistencias iniciales, por lo que se recomienda hacer mezclas de prueba.

9.9.3 Recomendaciones para dosificación y mezclado

Los siguientes aspectos son recomendables para la dosificación y mezcla de los concretos de alta densidad.

- La dosificación sigue los mismos principios dados por el ACI 211.1., en este mismo capítulo se dan recomendaciones adicionales.
- Cargar la mezcladora al 50% de su capacidad.
- No excederse en el tiempo de mezclado, pues algunos agregados pesados son disgregables, ocasionando alteraciones en la manejabilidad y fomentando la exudación.
- El concreto de alta densidad se puede colocar mediante bomba, pero a distancias cortas.

9.10 Concreto de contracción compensada

Los concretos de contracción compensada se elaboran por medio de la inclusión de un cemento expansivo, o un aditivo que se expanda durante el proceso de endurecimiento de la mezcla, de modo que contrarreste la contracción por secado del concreto, debida a la pérdida de humedad durante el endurecimiento.

Los concretos de contracción compensada son diseñados para que no pierdan volumen mientras ganan resistencia, controlando su fisuración o pérdida de nivel.

Su principal uso se encuentra en la construcción de losas de pisos industriales, reparación de elementos estructurales, pistas de patinaje, canchas deportivas, piscinas, tanques de agua y estanques; entre otros.

Los cementos usados para la elaboración de concretos de contracción compensada, son los tipos K, S y M, cuyo efecto expansivo se produce por la formación de etringita al ser mezclados con una cantidad suficiente agua. Su composición se encuentra entre el 75% y 90% de cemento Pórtland y el complemento, que le da el carácter expansivo, es aluminato y sulfato de calcio. En Colombia no se producen los cementos expansivos, pero se cuenta con aditivos que actúan directamente sobre los mecanismos causantes de la contracción en el momento de la hidratación del cemento, mientras reduce la tensión capilar del poro de agua en el concreto. La dosis recomendada es aproximadamente el 2% del peso del cemento.

Los métodos de dosificación, mezcla, colocación y curado, son similares a un concreto convencional (Figura 9.18), teniendo en cuenta ciertos detalles, como el de proporcionar un curado adicional que garantice la expansión esperada. El ACI 223 - 98 presenta una guía completa sobre las prácticas que se deben seguir en los concretos de contracción compensada. Y el procedimiento para determinar la contracción compensada, está relacionada en la norma ASTM C878.



Figura 9.18. Construcción de un piso industrial usando concreto con contracción compensada †

9.11 Concreto masivo

Según el ACI 116, el concreto masivo es cualquier volumen de concreto con dimensiones suficientemente grandes, que requieran de medidas para hacer frente a la genera-

ción de calor del cemento y controlar los cambios de volumen, con el fin de minimizar el agrietamiento. El concepto de concreto masivo incluye los concretos con bajos, medios y altos contenidos de cemento y es independiente de su resistencia.

El concreto masivo es usado principalmente en presas, y en estructuras que requieren altos volúmenes de concreto, como puentes y edificaciones. No obstante, muchos elementos de grandes dimensiones no se pueden catalogar como masivos, debido al bajo calor generado. Aunque no hay un tamaño de elemento específico, se puede considerar como crítico cuando la dimensión mínima de la sección transversal se acerca o supera 1 m, o cuando el contenido de cemento es mayor a 350 kg/m³.

9.11.1 Características de la mezcla

La principal característica del concreto masivo, es el aumento de temperatura que resulta del calor de hidratación, generado de los materiales cementantes, y que por acción del rápido descenso térmico o la diferencia de temperaturas entre el interior y el exterior de la estructura, se generan fisuras y grietas.

El aumento de temperatura en el concreto masivo depende, básicamente, de su temperatura inicial (Figura 9.19), la temperatura ambiente, el tamaño del elemento y el tipo y cantidad de los materiales cementantes usados en la mezcla.

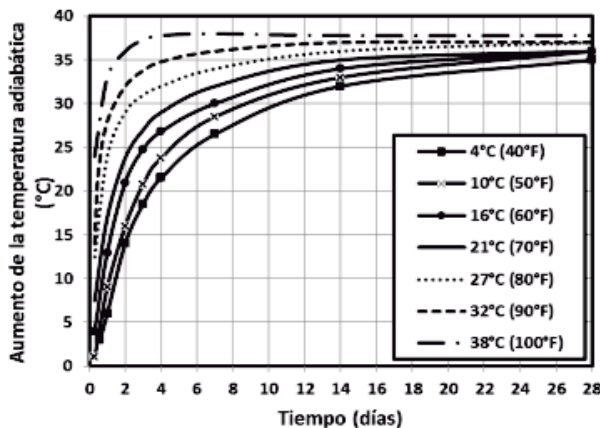


Figura 9.19. Efecto de la temperatura de colocación del concreto en el incremento de temperatura del concreto masivo con 223 kg de cemento/m³ de concreto (Adaptada de referencia 9.20)

En el concreto masivo, a medida que aumenta la temperatura en el interior de la estructura, el concreto se expande, la superficie se enfría y se contrae. Esto

ocasiona esfuerzos de tracción que pueden generar fisuras y grietas. De acuerdo con la experiencia e investigaciones realizadas, se ha determinado que el diferencial máximo de temperatura entre el interior de la estructura y la superficie del concreto debe ser menor de 20°C, para minimizar o evitar el riesgo de agrietamiento. Al mantenerse un diferencial de temperatura menor a 20°C, se asegura un enfriamiento lento hasta alcanzar la temperatura ambiente. En el evento que se quiera determinar con exactitud el diferencial de temperatura de una estructura en particular, el ACI 207 facilita las ecuaciones.

9.11.2 Características de los materiales

El cemento especificado es de bajo calor de hidratación tipos BCH o MCH (NTC 121) o tipos II o IV (ASTM C150). El uso de algunos tipos de materiales cementantes suplementarios son de gran ayuda, pues como se mencionó en el capítulo de cemento, el bajo o nulo calor de hidratación generado los hacen ideales para este tipo de concretos. A manera de ejemplo, el calor de hidratación de la puzolana puede ser entre el 25% y 75% del cemento. En el caso del metacaolín, lo puede disminuir hasta un 27% cuando se usa mezclado con un cemento Tipo I. Sin embargo, algunas puzolanas pueden aumentar el calor de hidratación, como es el caso de la microsílíce y algunos tipos de cenizas volantes. La Figura 9.20 muestra la temperatura de un elemento, en diferentes posiciones de una estructura.

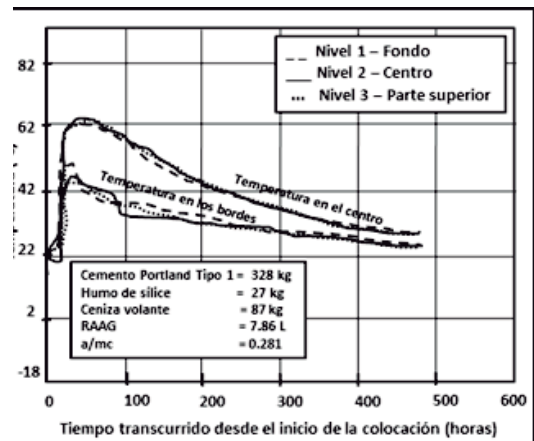


Figura 9.20. Ejemplo de diferencial de temperatura de una estructura masiva. Caisson de 3 m de diámetro x 12,2 m de altura (Adaptado de referencia 9.20)

En los agregados, se recomienda el uso del mayor tamaño máximo posible (75 a 150 mm). Además, que se encuentren bien gradados y cumplan con los requisitos de limpieza y demás características de la norma. El uso de aditivos, como los retardantes de fraguado, puede ayudar a bajar el calor de hidratación. La Figura 9.21 muestra un ejemplo de colocación de concreto masivo en un proyecto de infraestructura.



Figura 9.21. Fundida de estructuras con concretos masivos
Vertedero- Proyecto hidroeléctrico Ituango- Colombia.
Cortesía Constructora Conconcreto

9.11.3 Recomendaciones adicionales para mitigar el aumento de temperatura interna

Las siguientes recomendaciones generales ayudan a controlar el aumento de temperatura interna de los concretos masivos:

- Usar bajos contenidos de cemento, tanto como sea posible, sin afectar la resistencia ni la durabilidad. Valores entre 120 y 270 kg/m³ son los recomendables.
- Emplear alto contenido de agregado grueso. Hasta el 80% del contenido total de agregados.
- Usar el TM más grande que sea posible.
- Usar cementos de bajo calor de hidratación y materiales cementantes suplementarios, que efectivamente permitan su reducción.
- Reducir la temperatura inicial del concreto: enfriando los agregados; usando agua de mezcla

en forma de escarcha; introduciendo nitrógeno líquido.

- Colocar tuberías en el interior de la estructura, para circular agua fría.
- Realizar colocación de pequeños volúmenes de concreto, menores a 1,5 m³.
- Curar de manera intensa y permanente con agua.

9.12 Concreto de color

La posibilidad de concretos con diferentes colores se hace a través de la adición de pigmentos minerales, con agregados de colores, o con tratamientos con ácidos. También es factible la obtención de concretos blancos o claros.

9.12.1 Concreto coloreado con pigmentos

Los pigmentos usados para darle color al concreto deben ser inorgánicos, y pueden ser de origen natural, o producidos industrialmente (sintéticos). En general, producen colores tierra (Figura 9.22); deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Ser óxidos inorgánicos puros.
- Tener una finura mayor que la del cemento.
- Ser insolubles en agua.
- Ser libres de sales y ácidos solubles.
- Tener estabilidad de color ante exposiciones climáticas (viento, sol, lluvia), en especial ante los rayos ultravioleta (UV).
- Resistir el ataque de ácidos.
- Estar libres de sales que los puedan manchar en presencia de agua (causar eflorescencias).
- Libres de sulfato de calcio.



Figura 9.22. Colores terracota producidos por pigmentos minerales.

Cortesía Adoquin-AR

En la Tabla 9.10 se enseñan los óxidos requeridos para formar los diferentes colores. Los más nítidos, claros y brillantes en el concreto se logran usando cemento blanco, en comparación con un concreto coloreado a base de cemento gris. Los pigmentos sintéticos generalmente producen colores más uniformes.

Tabla 9.10.
Colores producidos con los diferentes óxidos

Color	Óxido requerido
Blanco	Dióxido de titanio
Rojo	Óxido de hierro rojo
Café	Óxido de hierro café
Amarillo	Óxido de hierro amarillo
Negro	Óxido de hierro negro
Azul	Óxido de cobalto, azul ultramar
Verde	Óxido de cromo

La cantidad de pigmento adicionada al concreto, depende del color requerido y del tipo y la calidad del pigmento. En general no debe ser mayor al 10% por peso del cemento. Cantidades pequeñas (alrededor del 2% por peso de cemento) producen tonos pastel, mientras que los colores más fuertes requieren de mayores cuantías.

Se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones durante la dosificación, mezcla, colocación y curado:

- Para mantener el color uniforme en el concreto, no se deben emplear acelerantes que contengan cloruro de calcio.
- Dosificar todos los materiales por peso y en las cantidades lo más exactas posible.
- Premezclar el cemento con el pigmento en seco antes de colocarlo en la mezcladora.
- Mezclar todos los ingredientes durante un tiempo suficiente, para asegurar uniformidad en el color.
- Si se usan aditivos, hacer mezclas de prueba para verificar que no alteran el color.
- No usar desmoldantes que manchen o alteren el color de la superficie del concreto.

9.12.2 Concreto coloreado por los agregados

Para obtener concretos coloreados a base de agregados, estos deben quedar expuestos (Figura 9.23), lo cual se puede lograr:

- Colocando en la formaleta una película de retardante de fraguado, acompañada con un posterior lavado o cepillado de la superficie.
- Puliendo el concreto con esmeriles o lijas.
- Removiendo el mortero y pasta de la superficie, mediante lavado con chorro de agua o ácido, o de martillo mecánico.
- Mediante procesos que fracturen la superficie del concreto, exponiendo los agregados
- Los agregados pueden ser naturales (cuarzo, mármol) o cerámicos y deben ser escogidos por su tamaño, color, brillo, textura, forma y demás características, dependiendo de la superficie que se quiera lograr. También es factible del uso conjunto de agregado y pigmentos para conseguir concretos coloreados.

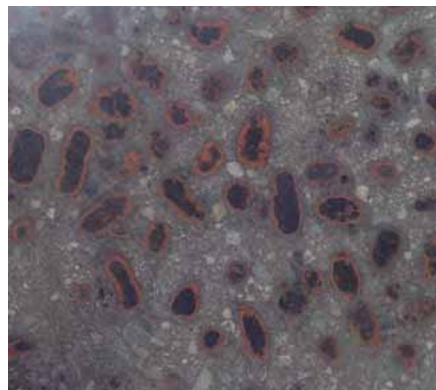


Figura 9.23. Concreto liviano con agregado expuesto
Cortesía Darwin Torres

9.12.3 Concreto blanco o claro

Para la elaboración del concreto blanco se requiere tener en cuenta algunos aspectos especiales durante la escogencia de los materiales, el proceso de elaboración de la mezcla, el vaciado, el curado y el mantenimiento de la estructura.

Escogencia de los materiales Cemento

Se debe elaborar con cemento blanco, que en general tiene las mismas propiedades del gris, pero con poca o nula presencia de hierro, magnesio y manganeso, elementos que le dan el color gris. En Colombia se fabrica bajo la norma NTC 1362, que entre otras, especifica el índice de blancura.

Dado el costo que puede representar el cemento blanco, se puede tener la alternativa del cemento gris fabricado con productos que sean claros, como la adición de puzolana natural o la caliza molida; para estos casos ya no se tendrían concretos blancos sino claros. No se recomienda el empleo de materiales cementantes suplementarios como cenizas volantes de carbón o la microsílíce.

Agregados

Los agregados deben ser blancos o claros, en especial la arena, que es la que conforma la capa de mortero superficial de la estructura. Se recomienda que su elección y compra sea de una sola fuente y de un mismo estrato geológico, para minimizar la variación de la tonalidad entre los diferentes lotes. Las arenas no se deben decolorar o contener materiales como sales, materia orgánica, y especialmente, partículas de hierro que puedan manchar el concreto o causar tonalidades. Deben cumplir con la norma NTC 174.

Agua de mezcla y de curado

El agua de mezclado y curado no debe contener elementos ni sustancias que manchen la estructura, en particular el óxido de hierro. Preferiblemente se debe usar agua del acueducto y ésta debe estar almacenada en recipientes limpios. El agua para ambos procesos debe cumplir con la norma NTC 3459.

Aditivos

Se pueden emplear aditivos en la mezcla siempre que no produzcan manchas ni tonalidades en la superficie. Se recomienda hacer mezclas de prueba previas que garanticen además la compatibilidad con los otros materiales usados.

Desmoldantes y curadores

Se recomienda usar desmoldantes hechos con

productos naturales biodegradables que no manchen. Tampoco se deben usar curadores que alteren el color o que fomenten el manchado, como los base parafina y aceites. Para este proceso se recomienda el uso de abundante agua aplicada de manera continua y el uso de curadores basados en resinas acrílicas.

Limpieza de las herramientas

Se debe evitar el uso de herramientas manchadas u oxidadas. Esto incluye mezcladora, palas, carretillas, tolvas, canaletas de colocación, y los vibradores o afinadores. Antes de la colocación se recomienda el uso de limpiadores a base de solvente para las superficies y herramientas.

Desencofrado de la estructura

La tonalidad clara de los concretos depende de la rapidez del desencofrado; es recomendable tener presentes las pausas de trabajo en la obra, en especial los fines de semana y los días festivos.

Protección y mantenimiento

La protección del concreto blanco se puede realizar mediante recubrimientos hidrófugos que repelan el agua y eviten la formación de manchas producidas por la acumulación de polvo, hollín, algas y smog. También se puede aplicar un material acrílico que impermeabilice. En cualquier caso, es necesario hacer pruebas previas para ver su acabado final y que no altere la tonalidad del blanco especificado.

El mantenimiento de los concretos blancos se puede realizar con un simple lavado con agua a presión o con agua y restregado con cepillo. También es conveniente la re-aplicación de los materiales protectores cuando se requiera.

9.13 Concreto con agregado precolocado

La tecnología del concreto con agregado precolocado consiste, como su nombre lo sugiere, en colocar dentro de la formaleta el agregado grueso e inyectarle posteriormente el mortero para llenar los vacíos dejados por estos. Para facilitar la penetración del mortero, generalmente se dosifica un aditivo plastificante.

Las propiedades de este concreto son similares a las de un concreto corriente vaciado con métodos convencionales, con la ventaja que presenta menor contracción térmica y por secado, debido al contacto directo de las partículas de agregados.

Algunas aplicaciones de estos concretos son: estructuras vaciadas bajo agua; columnas de puentes; trabajos de reparación y restauración; concretos arquitectónicos con tratamientos posteriores de chorro de arena o cepillada con grata (cepillo de alambre) a edades tempranas de endurecimiento.

El agregado grueso debe cumplir con la NTC 174. Normalmente las especificaciones para este tipo de concretos limitan el tamaño máximo a 75 mm, como el mínimo a 12,5 mm. Además, los agregados deben estar gradados de tal forma que produzcan un contenido de vacíos entre el 35% y 40%.

Por su parte, la arena debe ser muy fina para facilitar la penetración y el llenado de todos los vacíos. El módulo de finura debe estar entre 1,2 y 2,0, de modo que prácticamente todo el material pase el tamiz 1,25 (N° 16).

El control de calidad de los concretos de agregado precolocado se realiza mediante las normas ASTM C937 y C 943. La primera cubre los requisitos que deben cumplir los ingredientes del mortero, como son los materiales cementantes, la composición del agregado fino, y las propiedades que debe cumplir el fluidificante usado. La segunda se refiere a la elaboración de probetas estándar (cilindros y viguetas), para la determinación de la resistencia y la densidad en pruebas de laboratorio.

9.14 Concreto de impresión 3D

9.14.1 Características generales del sistema

Uno de los desarrollos más recientes e innovadores de la industria de la construcción, lo constituye el sistema de Impresión 3D, basado en la idea que los elementos se construyen capa por capa, similar a la impresión con tinta, la cual se aplica también por capas sobre el papel. Cuando se repite el proceso de impresión tradicional varias veces, pero con un material sólido como el concreto en lugar de tinta, y con desplazamientos para crear movimiento en las capas, se obtiene una impresión 3D.

En el sistema de construcción 3D, la fabricación de componentes se hace mediante la técnica conocida como manufactura aditiva, en la que el material es

aplicado en capas a través de una boquilla, para formar una pieza continua, permitiendo construir formas geométricas complejas sin formaleta, tal como se aprecia en las figuras 9.24 y 9.25.



Figura 9.24. Boquilla impresora 3D de concreto gran formato Laboratorio de innovación de Constructora Concreto †



Figura 9.25. Impresión en 3D gran formato Laboratorio de innovación de Constructora Concreto †

El sistema 3D presenta varias ventajas como el considerable ahorro de materiales, tiempo, mano de obra, consumo de energía y desperdicios; además de no requerir, prácticamente, de supervisión. Algunas experiencias muestran como el sistema 3D, comparado con el promedio de un proyecto de construcción tradicional de una vivienda, requiere un 60% menos de material, el 70% menos de tiempo y un 80% menos de mano de obra. Actualmente hay impresoras instaladas de grandes proporciones (6,1 m de alto, 10,1 m de ancho y 40,2 m de largo). Colombia ya incursionó en esta tecnología, siendo la empresa Constructora Concreto la pionera.

9.14.2 Características de la mezcla

El desarrollo de la mezcla de concreto para la

impresión 3D constituye todo un desafío. Requiere que la mezcla tenga una plasticidad tal, que permita ser extruida a través de una boquilla de impresión, con el fin de formar pequeñas capas que crearán finalmente las piezas. También debe tener la suficiente capacidad de soporte y cohesividad, para permitir que la mezcla se mantenga en posición, y sea lo suficientemente rígida para soportar las capas adicionales sin colapsar. Además, debe tener trabajabilidad y cohesividad suficiente, para permitir la adherencia entre las capas. La resistencia debe cumplir con los parámetros establecidos en el diseño.

La mezcla para el sistema 3D requiere de una serie de atributos muy particulares; específicamente, necesita que sea:

Extruable: se refiere a la capacidad de la mezcla para que pueda ser extruida; es decir, que pueda ser pasada por una boquilla de diámetro pequeño, para formar filamentos de concreto.

Trabajable: que tenga una consistencia o un grado de humedad adecuado. Su medición se puede realizar mediante el procedimiento dado por la norma UNE-EN-1015-3, que determina la consistencia de morteros frescos usando el método del escurrimiento.

Open time: que tenga la capacidad de mantener su trabajabilidad con el tiempo.

Buildability (Edificable): que es la capacidad de la mezcla para ser conformada en capas.

Resistente a la compresión: que cumpla con los requisitos de resistencia a la compresión establecidos en la especificación.

Resistente a la flexión: se refiere al módulo de rotura especificado. Este parámetro puede variar en función del elemento que se quiera fabricar. Con el sistema 3D se han obtenido valores promedio de 5 MPa a 28 días.

La mezcla cuenta con algunas limitaciones, como el uso de fibras metálicas, toda vez que atascan la boquilla; en el evento de requerir el uso de fibras, se pueden usar las de nylon o las de polietileno o polipropileno, garantizando en todo caso que no se apelmacen. Otra de las limitaciones es el uso de un tamaño máximo de agregado de 5 mm, dado el diámetro de la boquilla; es decir, el sistema trabaja con morteros.

9.15 Referencias y bibliografía recomendada

9.1 ACI 522 R 06. Concreto Permeable. ACI. Farmington Hill, 2006.

9.2 ACI 116. Terminología del cemento y del concreto. ACI, Farmington Hill, 2000.

9.3 ACI 207. Sistemas de colocación y enfriamiento del concreto masivo. ACI, Farmington Hill, 1998.

9.4 ACI 207.5R. Concreto compactado con rodillo del concreto masivo. ACI, Farmington Hill, 1999.

9.5 ACI 211. Práctica recomendada para la selección de las proporciones de concreto masivo, normal y liviano. ACI, Farmington Hill, 1997.

9.6 ACI 223. Práctica para uso del concreto con contracción compensada. ACI, Farmington Hill, 1998.

9.7 ACI 304. Guía para la dosificación, mezcla, transporte y colocación del concreto. ACI. Farmington Hill, 1995.

9.8 ACI 363. Estado del arte del concreto de alta resistencia. ACI. Farmington Hill, 2000.

9.9 ACI 506. Concreto lanzado reforzado con fibras. ACI. Farmington Hill, 1998.

9.10 ASTM C1688 – Densidad y contenido de vacíos del concreto permeable. ASTM. Philadelphia, 2004.

9.11 MATA LLANA R. Ficha técnica – Recomendaciones para concreto blanco. Toxement, Bogotá 2014.

9.12 MATA LLANA R. Ficha técnica – Recomendaciones para concreto bombeado. Toxement, Bogotá 2014.

9.13 MATA LLANA R. Ficha técnica – Recomendaciones para concreto autocompactante. Toxement, Bogotá 2013.

9.14 MATA LLANA R. Ficha técnica – Recomendaciones para concreto poroso. Toxement, Bogotá 2014.

ment, Bogotá 2014.

9.15 MATAALLANA R. Ficha técnica – Recomendaciones para concreto compactado con rodillo. Toxement, Bogotá 2014.

9.16 MATAALLANA R. Ficha técnica – Recomendaciones para concreto Tremie. Toxement, Bogotá 2014.

9.17 MATAALLANA R. Ficha técnica – Recomendaciones para concreto de alto desempeño. Toxement, Bogotá 2015.

9.18 MATAALLANA R. Fundamentos de concreto aplicados a la construcción. ICPC. Bogotá, 2007.

9.19 NEVILLE A. M. Tecnología del concreto. IMCYC. México D.F. 1999.

9.20 PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Diseño y control de mezclas de concreto. PCA. Skokie, Illinois, EEUU, 2004.

9.21 RAMÍREZ J. Formulación y determinación de las propiedades físicas de un concreto poroso. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2012.

10

Concreto con agregado liviano

El concreto liviano tiene aplicaciones estructurales, de resistencia al fuego y aislamiento térmico y acústico, que permite gran variedad de aplicaciones para soluciones en ingeniería y arquitectura.

Podría pensarse que el concreto liviano es un material nuevo. Sin embargo data de la época del Imperio Romano, hace cerca de 2.000 años, con el cual se construyeron obras emblemáticas que aun hoy se encuentran en pie, como la bóveda del famoso Panteón (terminada en el año 27 a.C) y el monumental Coliseo (año 80 d.C), donde se usaron agregados livianos naturales como piedra pómez y lava volcánica triturada.

No obstante, en la actualidad el concreto con agregado liviano es uno de los materiales que se ha venido desarrollando en una variedad de aplicaciones estructurales, de aislamiento (acústicas y tér-

micas) y arquitectónicas. Por ello, se está ganando el reconocimiento en el gremio de la construcción en el ámbito mundial, a tal punto que hoy se autoriza su uso en los códigos y normas, como es el caso de la NSR - 10 siempre y cuando se cumpla con las respectivas normas para agregados livianos estructurales.

En capítulos anteriores se estudiaron diferentes tipos de concreto. Pero, en relación con los concretos que incluyen el uso de agregados livianos, se pueden clasificar como se muestra en la Figura 10.1.

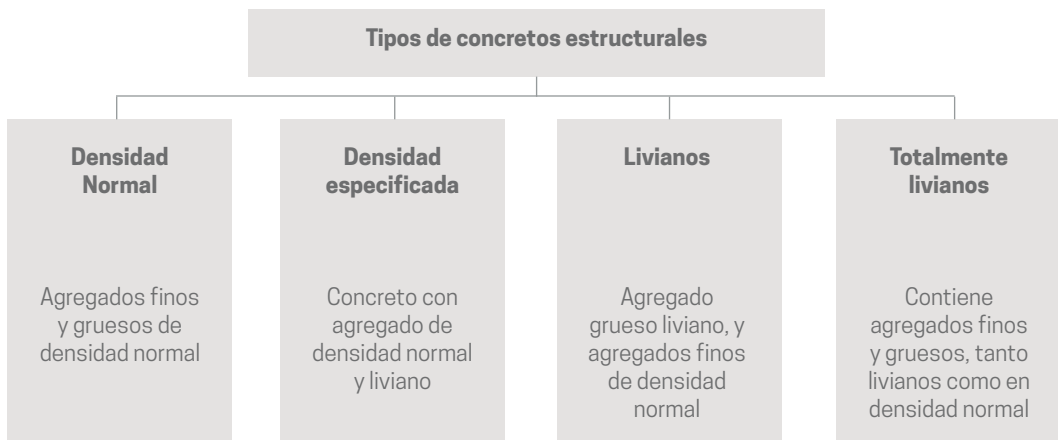


Figura 10.1. Tipos de concreto y el uso de agregados livianos

Dentro de las aplicaciones estructurales del concreto con agregado liviano se encuentran pisos, muros, techos, bóvedas, tableros de puentes, prefabricados y elementos pretensados, entre otros. De otra parte, y teniendo en cuenta aspectos arquitectónicos, las diferentes formas del concreto, se pueden realizar de mejor manera con éste tipo de concreto que con cualquier otro medio. Y desde el punto de vista del aislamiento y la habitabilidad, el desempeño acústico y térmico de este material brinda la versatilidad para cumplir a cabalidad las especificaciones.

En el presente capítulo, se proporcionan las pautas generales y se muestran los aspectos más relevantes para la preparación y aplicación del concreto con agregado liviano, desde el punto de vista estructural y de aislamiento térmico y acústico.

10.1 Generalidades

La producción de concreto liviano se puede lograr mediante el uso de agregados livianos (arena y grava), o con una combinación de agregado grueso liviano y arena natural, dependiendo de la densidad que se quiera lograr. Con el uso de agregados livianos se pueden tener concretos más durables a largo plazo, toda vez que se mejora la hidratación del cemento y hay una mayor compatibilidad elástica entre el agregado y la matriz cementicia, reduciendo la formación de grietas.

El concreto liviano es aquel cuya densidad de equilibrio (Masa unitaria) puede variar entre 1.440 y 1.840 kg/m³, aunque algunas especificaciones pueden permitir hasta 1.900 kg/m³.

Cabe recordar que la densidad del concreto normal es de aproximadamente 2.400 kg/m³. La baja densidad se aprovecha para reducir el peso muerto de los elementos, característica deseada por los diseñadores estructurales de edificios, principalmente en las losas de entrepiso, obteniendo beneficios económicos.

La resistencia a la compresión del concreto con agregado liviano, para que se pueda considerar como estructural, debe superar los 17 MPa (170 kg/cm² ó 2.500 psi), según lo establecido por la NSR - 10, pudiéndose producir incluso concretos de alta resistencia con agregados livianos estructurales. Sin embargo, esta norma limita su resistencia hasta los 35 MPa.

Al concreto liviano estructural también se le puede incorporar aire para que cumpla los propósitos

de durabilidad estudiados en el Capítulo 5, elemento que también contribuye a bajar la densidad al concreto.

Los concretos estructurales con agregado liviano requieren un estricto control, puesto que cada tipo produce un concreto totalmente diferente. Además, las propiedades del concreto se ven modificadas en gran medida por la granulometría del agregado y el contenido de cemento, tal como sucede en los concretos de densidad normal. Los agregados livianos tienen mayor y más rápida absorción de agua. Al igual que en los concretos de densidad normal, según la geometría y tipo del agregado liviano, pueden resultar mezclas de muy buena trabajabilidad o que son más ásperas, en cuyo caso esto se puede atenuar con la inclusión de aire.

10.2 Agregados livianos estructurales

10.2.1 Clasificación

Los agregados livianos estructurales pueden ser naturales o procesados industrialmente (termo-expandidos). Dentro de los naturales se encuentran los materiales volcánicos como la piedra pómez, escoria y lava triturada, entre otros. Los agregados livianos estructurales más usados son los procesados o producidos industrialmente o termo-expandidos, que incluyen las arcillas, pizarras y esquistos expandidas en hornos rotatorios, esquistos y pizarras expandidas ceniza volante peletizada o extruida y escorias expandidas.

Sin embargo, no todos los materiales livianos pueden ser utilizados para hacer concreto liviano, pues estos deben cumplir con los requisitos de calidad de la NTC 4045 (ASTM C330). Por ejemplo, para realizar concreto estructural no está permitido el uso de materiales tales como trozos o perlas de poliestireno expandido (porón), plástico, caucho, o fibras naturales, entre muchos otros.

10.2.2 Producción de los agregados

Los agregados livianos deben su baja densidad a la estructura celular de sus partículas individuales, originada por la expansión que sufren las materias primas al someterlas a temperaturas cercanas a 1.100 °C, bien sea por: atrapar gases formados por la reacción

del calor con ciertos constituyentes de las materias primas; por el sometimiento de la masa, luego del calentamiento, a cantidades controladas de agua o vapor, formando una estructura celular durante el enfriamiento de la masa; o quemando materiales combustibles dentro de una matriz, de modo que las celdas formadas en el agregado pueden variar de tamaño de micro a macro, pudiendo o no estar interconectadas.

Las materias primas usadas en la producción comercial de agregados livianos estructurales pueden provenir de depósitos de esquistos, pizarras o arcillas, o de productos de otras industrias, como la escoria de alto horno en la producción del acero.

Existen muchos métodos para llevar a cabo la expansión, caso en el que las materias primas requieren de un tratamiento previo, como la aglomeración con agua para las partículas finas, o de la trituration en partículas grandes. Los procesos más empleados para la expansión son a través del horno rotatorio, la sinterización y la expansión de la escoria.

El proceso del horno rotatorio sigue el mismo principio de la producción de Clínter, explicado con cierto grado de detalle en el Capítulo de Cemento Hidráulico. El calor aplicado en el horno genera gases, que son atrapados en la masa ablandada de la materia prima, formando una estructura celular interna que se mantiene por la vitrificación durante el enfriamiento.

En el caso del proceso de sinterización, las materias primas usadas contienen materiales a base de carbón, que sirven como combustible, o son mezclados con materiales combustibles (carbón finamente molido o coke), de modo que al aplicarles altas temperaturas se genera la expansión y la formación de la estructura celular.

Por su parte, existen varios procesos para expandir la escoria y formar la estructura celular de las partículas, destacándose tres: el de la máquina, del foso y de peletización. El primero consiste en agitar rápidamente la escoria, derretida a más de 1.200 °C, en una máquina con una cantidad controlada de agua. En el proceso del foso, la escoria derretida entre 1.200 y 1.400 °C, es tratada con una cantidad controlada de agua inyectada, y posteriormente enfriada y triturada. Para el proceso de peletización, la escoria derretida a más de 1.200 °C, es tratada con cantidades limitadas de agua y distribuida por vibración con agua fría y carbón, en un tambor rotatorio

provisto de aletas que rompen la escoria en partículas pequeñas, que solidifican dentro de pellets redondeados y lanzados a través del aire.

10.2.3 Propiedades del agregado liviano

Al igual que sucede con los agregados de densidad normal, las propiedades de los agregados livianos estructurales influyen en las características del concreto, tanto en estado fresco como endurecido.

Forma y textura superficial

Estas propiedades dependen del origen de los agregados o del método de producción. La superficie puede ser desde lisa, con pequeños poros expuestos, hasta rugosa con grandes poros exhibidos. La forma puede ser desde redondeada hasta angular sin guardar ninguna regularidad. Tanto la forma como la textura de las partículas del agregado fino y grueso, al igual que los agregados de densidad normal, influyen en la manejabilidad, bombeabilidad, contenidos de cemento, requerimientos de agua, grado de acomodación y resistencia.

Densidad suelta a granel

La densidad suelta a granel varía con el tamaño de partícula y del proceso de producción empleado, siendo la más alta en el agregado fino y la más baja para el agregado grueso.

El rango práctico de la densidad suelta del agregado liviano, corregido a la condición seca, se encuentra entre 1/3 y 2/3 de los agregados de densidad normal. Cuando se encuentra por debajo de este rango, las cuantías de cemento determinadas para lograr la resistencia requerida pueden resultar antieconómicas. Cuando se encuentra por encima, el peso puede no cumplir con las especificaciones de los agregados de peso liviano.

Densidad suelta (Masa unitaria)

Para la misma gradación y forma de partícula, la densidad suelta del agregado es proporcional a la densidad aparente. Sin embargo, agregados con la misma densidad aparente pueden tener marcadas diferencias en las

densidades sueltas, debido a los diferentes porcentajes de vacíos en los volúmenes suelto y compacto de agregados de diferente forma de partícula.

La situación es análoga para la grava redondeada y piedra triturada, que para la densidad aparente y gradación, pueden tener una diferencia aproximada de 160 kg/m³ en condición compactada seca. Agregados livianos angulares y redondeados, con la misma densidad aparente, pueden diferir por 80 kg/m³ o más en condición seca suelta. Sin embargo, el mismo peso de cualquiera de estos ocupa el mismo volumen en concreto, lo que se debe considerar para determinar la trabajabilidad cuando se usan diferentes agregados. En la Tabla 10.1, se enseñan los valores de la densidad suelta establecidas por la NTC 4045 en agregados livianos para uso en concretos estructurales.

Tabla 10.1. Requisitos para la densidad suelta para agregados livianos de uso estructural (10.4)

Designación del tamaño	Densidad suelta seca, máximo, kg/m ³
Agregado fino	1.120
Agregado grueso	880
Agregados finos y combinados	1.040

Tamaño máximo

Normalmente, los tamaños máximos disponibles de los agregados livianos son de 25 mm, 19 mm, 12,5 mm o 9,5 mm. El tamaño máximo de los agregados influye en factores como trabajabilidad, relación agregado fino/grueso, contenido de cemento, óptimo contenido de aire, potencial de resistencia techo y contracción por secado. Para elaborar concreto estructural se prefiere el uso de agregados livianos con tamaño máximo de 12 mm y menores, tal como se estudia más adelante con el concepto de resistencia techo.

Resistencia de los agregados livianos

La resistencia de las partículas de agregado varía con el tipo y fuente y se mide solamente de forma cualitativa. Algunas partículas pueden ser fuertes y duras y otras débiles y deleznales. Para concretos con resistencias a la compresión de hasta 35 MPa (350 kg/cm² ó 5.000 psi) no hay una correlación confiable entre la resistencia del agregado y la del concreto.

Resistencia techo

El concepto de “resistencia techo” resulta útil para indicar la resistencia a la compresión máxima que atañe a concretos hechos con un agregado dado, sea de densidad normal o liviano, usando una cuantía de cemento razonable. Así, una mezcla está cerca de su resistencia techo cuando mezclas similares, al usar contenidos de cemento más altos, sólo presentan un ligero incremento en la resistencia.

La resistencia techo está influenciada, predominantemente, por el agregado grueso. Se encontró que la resistencia techo en los concretos con agregados livianos, puede incrementarse apreciablemente reduciendo el tamaño máximo del agregado grueso. Este efecto es aún más evidente cuando se tienen agregados más débiles y deleznales.

Contenido de humedad y absorción

Debido a su estructura celular, la capacidad de absorción de agua de los agregados livianos es mayor que la de un agregado de densidad normal. Por esto, su absorción se mide dejándolo en inmersión más tiempo que el agregado normal. Por ejemplo, en pruebas de absorción de 24 horas, los agregados livianos generalmente absorben entre el 5% y el 20% en peso respecto al agregado en estado seco, dependiendo de la estructura de poros del agregado. En ocasiones puede incluso ser hasta del 30%. La absorción medida a las 72 horas, es posible que incremente el valor de la absorción a 24 horas entre 5% y hasta un 10%. Normalmente, bajo condiciones de almacenamiento en pila, el contenido de humedad no excede de las 2/3 partes de la absorción a 72 horas.

En contraste, es usual que los agregados con densidad normal absorban menos del 4% de humedad. Sin embargo el contenido de humedad de un agregado con densidad normal puede ser tan alto como entre el 5% al 10% o más. La diferencia importante está en que el contenido de humedad de los agregados livianos es mayor en el interior de las partículas, mientras que en los agregados de densidad normal es más grande la humedad en la superficie. Estas diferencias son importantes en la dosificación y control de las mezclas.

La Figura 10.2 muestra los diferentes estados de humedad de un agregado liviano. Por lo general, en obra o en una planta de mezclas, el agregado liviano no alcanza la condición de saturado y superficialmente seco. Esto significa que en el proceso de mezcla del concreto y el bombeo, parte del agua de la mezcla sea absorbida por el agregado liviano. Es de anotar que el agua internamente absorbida en

los agregados livianos, no está disponible inmediatamente para el cemento con el agua de mezclado. Por tanto, ante la imposibilidad práctica de controlar en forma precisa la relación a/mc en los concretos livianos, la mayoría de las especificaciones y normas permiten ajustar la cantidad de agua para recuperar la trabajabilidad.

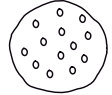
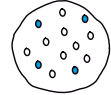






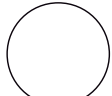



Partícula				
Volumen unitario				
Posición del agua				
Estado	Seco al horno	Húmedo Seco al aire	Húmedo con agua superficial	Saturado Superficialmente seco

Figura 10.2. Estados de humedad de los agregados livianos*

La velocidad de absorción en los agregados livianos depende de las características de los poros en la superficie de las partículas, y la interconectividad que tengan con los poros interiores. La Figura 10.3 ilustra la velocidad de absorción de una arcilla termoexpandida en comparación con el agregado de densidad normal. Para el caso de curado interno, se puede elaborar igualmente una curva de desorción para el agregado liviano.

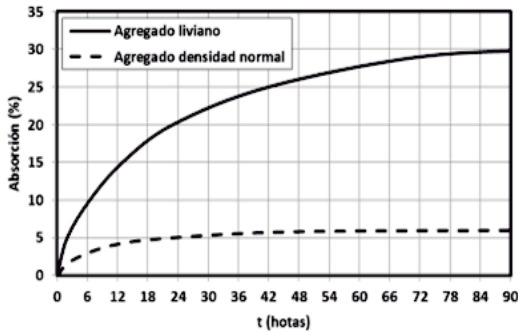


Figura 10.3. Velocidad de absorción de una arcilla termoexpandida (Livitek*)

Para lograr la condición de saturación total del agregado, estos se pueden almacenar antes de la fa-

bricación del concreto, usando un sistema de aspersión o riego de agua, por un lapso entre 48 y 72 horas antes de su uso. Otra alternativa es almacenarlos en piscinas con agua durante ese mismo período, siendo particularmente importante cuando el concreto con agregados livianos va a ser bombeado. La alta presión del concreto fresco dentro de la tubería aumentará la velocidad de absorción del agua, llevándola dentro del agregado y bajando drásticamente la plasticidad de la mezcla, que por lo general termina atascando los ductos.

Granulometría

Los requisitos de gradación en los agregados livianos son diferentes a los agregados de densidad normal, debido a que las partículas pequeñas en los agregados livianos aumentan la densidad del concreto. Sin embargo, pese a esta diferencia, se obtiene la misma distribución volumétrica en los agregados retenidos en una serie de tamices. La Tabla 10.2 muestra los requisitos granulométricos dados por la NTC 4045 (ASTM C330) para agregados livianos de concreto estructural

Tabla 10.2. Requisitos granulométricos para agregados livianos en concreto estructural (10.4)

Designación tamaño nominal, mm		% Pasa, tamiz, mm									
		25	19	12,5	9,5	4,75	2,36	1,18	0,300	0,150	0,075
Agregado fino	4,75 a 0	-	-	-	100	85 a 100	-	40 a 80	10 a 35	5 a 25	-
Agregado grueso	25 a 4,75	95 a 100	-	25 a 60	-	0 a 10	-	-	-	-	0 a 10
	19 a 4,75	100	90 a 100	-	10 a 50	0 a 15	-	-	-	-	0 a 10
	12,5 a 4,75	-	100	90 a 100	40 a 80	0 a 20	0 a 10	-	-	-	0 a 10
	9,5 a 2,36	-	-	100	80 a 100	5 a 40	0 a 20	0 a 10	-	-	0 a 10
Combinación de agregado fino y grueso	12,5 a 0	-	100	95 a 100	-	5 a 80	-	-	5 a 20	2 a 15	0 a 10
	9,5 a 0	-	-	100	90 a 100	65 a 90	35 a 65	-	10 a 25	5 a 15	0 a 10

Los productores de agregado liviano normalmente los separan y almacenan en diferentes rangos de tamaños, tales como gruesos, intermedios y finos. En la fabricación del concreto se combinan los tamaños, o el reemplazo de toda o parte de los agregados con densidad normal. Esto permite obtener una variada gama de densidades. Por ello, el productor es quien debe determinar la combinación de agregados apropiada para cumplir con la densidad del concreto fresco y la densidad de equilibrio para las consideraciones al diseñar la carga muerta.

Debido a lo anterior, la NSR-10 define dos tipos de concretos livianos. Los concretos livianos con arena de densidad normal y los concretos completamente livianos. En los primeros, se reemplaza parte o la totalidad de los agregados gruesos por agregados livianos. Esta manera de dosificar el concreto liviano permite alcanzar densidades entre 1.750 y 1.840 kg/m³. En los concretos completamente livianos, el concreto se formula para que contenga tanto el agregado grueso como parte del fino livianos, mezclado con agregados de densidad normal. Esta manera de formularlo permite lograr concretos livianos con densidades entre 1.440 y 1.840 kg/m³.

Con el uso de aditivos reductores de agua con alto rango, raras veces se requiere el incremento del contenido de cemento respecto al concreto de densidad normal para reducir la relación a/mc y obtener las resistencias especificadas.

10.3 Propiedades del concreto liviano estructural

Basado en muchos estudios de laboratorio y registros de un gran número de estructuras existentes, que han prestado un servicio satisfactorio por más de 80 años, el Comité ACI 213R presenta un resumen que contiene las propiedades del concreto liviano estructural.

10.3.1 Resistencia a la compresión

El concreto liviano estructural se usa para la fabricación económica de diversas estructuras elaboradas en obra, prefabricadas o pretensadas, cuyos diseños requieren desde 17,5 MPa hasta más de 35 MPa. Algunas estructuras se han diseñado con resistencias de 60 MPa, requiriendo el uso del concepto de la resistencia techo para agregados livianos, la reducción del tamaño máximo, como se explicó en 10.2, y emplear aditivos reductores de agua de alto rango en la ayuda de la trabajabilidad y facilidad de colocación y terminado.

10.3.2 Densidad

Densidad en estado fresco

Esta propiedad del concreto le compete a la proporción de los agregados, cementantes, agua, aditivos y contenido de aire. Estos elementos, en su mayoría, son comunes a los concretos con densidad normal. En el caso del concreto liviano, esta propiedad se verá modificada en mayor medida por la densidad

de las partículas de agregados livianos, y la cantidad de agua absorbida en ellos.

La densidad en fresco es importante para diseñar la obra falsa o formaleta en la estructura, pues al disminuir la carga, al bajar la densidad del concreto, puede reflejar ahorros en los equipos necesarios y la cantidad de retajes intermedios y provisionales. Igualmente, mientras más baja sea la densidad, se obtendrá un incremento importante en el rendimiento de la mano de obra durante la colocación y menor cantidad de otros materiales.

La densidad en fresco será mayor que la densidad en equilibrio, debido a la pérdida de la humedad contenida en los agregados y al agua para la mezcla. La velocidad de este proceso está en función con las condiciones del medio ambiente y de la relación área superficial/volumen del elemento. Si se conoce la relación entre la densidad en fresco y la densidad de equilibrio para la mezcla, el diseñador debe establecer la máxima densidad en fresco, como criterio de aceptación en el momento de la colocación. Usualmente se encuentra entre 100 a 200 kg/m³.

Densidad de equilibrio

El ACI sugiere que las cargas propias usadas para el diseño se basen en la densidad de equilibrio que, para la mayoría de condiciones y elementos, podrían ser las medidas en el concreto liviano luego de 90 días de secado al aire.

Alternativamente, se puede determinar la densidad de equilibrio mediante el proceso de secado rápido, usando un horno a temperatura de 110 °C ± 5°C hasta que seque y no se presenten cambios en la densidad superiores a 0,5%, durante períodos de secado de 24 horas, como es el procedimiento de la ASTM C567. Al hacer el secado en horno, el valor obtenido puede ser inferior hasta en un 5%, respecto a la densidad de equilibrio determinada por secado al aire.

10.3.3 Concreto con densidad especificada

El empleo de los concretos con densidad especificada ha venido creciendo en el mundo, dada la eficiencia estructural que se logra (relación resistencia/densidad), la reducción de costos en el transporte de la mezcla y el mejoramiento en la hidratación de los concretos con altos contenidos de cemento y muy bajas relaciones a/mc. Estas mezclas tienen mejores condiciones de curado cuando se libera el agua de absorción en los agregados livianos,

produciéndose un curado interno del concreto, y una menor retracción.

*Se definen como **concretos con densidad especificada**, aquellos que contienen cantidades limitadas de agregados livianos y cuya densidad de equilibrio es mayor a 1.920 kg/m³, pero menor a los concretos compuestos enteramente por agregados de densidad normal.*

10.3.4 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del concreto depende de las cantidades relativas de pasta y agregados y el módulo de cada constituyente. El concreto de densidad normal tiene un módulo de elasticidad (E_c) más alto, porque los módulos de la arena y la grava son mayores que los agregados livianos. En general, el módulo de elasticidad del concreto liviano puede variar entre ½ y ¾ de los concretos con la misma resistencia.

Las variaciones en la gradación de los agregados livianos usualmente tienen poco efecto en el módulo de elasticidad, si los volúmenes de cemento, pasta y agregados permanecen constantes. La fórmula dada por la NSR - 10 (ACI - 318) se puede usar para valores con densidad (W_c) entre 1.440 y 2.560 kg/m³ y con resistencia entre 17,5 y 35 MPa (Ecuación 10.1). Los concretos en servicio se pueden desviar de esta fórmula hasta en un 20%. Cuando se requiere de un valor de E_c particular, se deben determinar en el laboratorio con el método descrito en la norma ASTM C469.

$$E_c = \{ W_c^{1.6} * 0,043 * \sqrt{f'_c} \text{ (en MPa)} \}$$

Ecuación 10.1

10.3.5 Contracción por secado

La contracción por secado es una propiedad importante que se refleja en agrietamiento, pérdida de pre-esfuerzo, disminución de la resistencia a la tensión y el alabeo.

El ACI encontró que, en concretos de baja resistencia, las muestras curadas de forma normal tienen mayor contracción por secado en los concretos livianos, comparadas con el patrón de densidad normal. Mientras que para altas resistencias, la contracción es menor. Para elementos grandes de concreto,

o aquellos en ambientes con humedad relativa alta, podrían sufrir menos contracción que los especímenes pequeños en condiciones de laboratorio y almacenados en humedad relativa del 50%.

Cuando se reemplaza parcial o totalmente arena natural por arena liviana, la contracción en el concreto liviano se reduce. Incluso, en concretos curados con vapor a presión atmosférica, la contracción por secado se puede reducir entre el 10% y el 40%.

10.3.6 Resistencia a la tracción

Tal como se estudió en el Capítulo 7, la resistencia a la tracción del concreto suele medirse indirectamente con la aplicación de carga a un cilindro estándar acostado. Para concretos livianos, la NSR-10 esta propiedad la denomina como resistencia al hendidamiento.

En el diseño del concreto estructural con agregado liviano se puede especificar, además de la resistencia a la compresión, la resistencia al hendidamiento para refinar el cálculo del anclaje en el acero de refuerzo y los esfuerzos a cortante. Así mismo, en concretos con resistencias a la compresión hasta 35 MPa, se usa para estimar la resistencia a la tensión diagonal.

La resistencia a la tracción del concreto liviano puede medirse directamente o con determinación teórica. Cuando se opta por ésta última, el valor varía entre 70% y 100% respecto a la referencia del concreto con densidad normal, cuando la comparación se hace para igual resistencia a la compresión.

El valor de la resistencia a la tracción del concreto liviano varía dependiendo del curado que se aplique, de modo que, cuando se hace continuamente con humedad, la resistencia es muy parecida a los rangos obtenidos con agregado de densidad normal; cuando el curado se hace al aire, la resistencia a la tracción se ve más afectada por el secado.

10.3.7 Módulo de rotura

La medición del módulo de rotura en el concreto liviano, al igual que en densidad normal, se mide utilizando viguetas estandarizadas cargadas en el tercio medio. Estudios indican que el módulo de rotura del concreto es muy sensible al contenido de humedad, por lo que bajo estas condiciones, los resultados no son confiables. Sin embargo, no es común la especificación del módulo de rotura para concretos con agregados livianos.

10.3.8 Durabilidad

Investigaciones desarrolladas a largo plazo por el ACI sobre la erosión de tableros de puentes y estructuras marinas sometidos a un medio ambiente severo, apoyan los resultados obtenidos en el laboratorio, donde se concluye que un concreto liviano bien proporcionado y colocado, tiene un desempeño igual o superior al de un concreto con densidad normal.

Cuando se usa aire incluido en el concreto liviano, este funciona de manera similar que en el concreto de densidad normal. Se ha demostrado que al combinar el sistema de poros en los agregados livianos y el aire incluido, reduce los niveles de concentración de materiales dañinos en el concreto.

De otra parte, algunos agregados livianos pueden tener en la superficie propia un polvillo con propiedades puzolánicas, como es el caso de la arcilla térmoeexpandida. Esta acción puzolánica, disminuye la permeabilidad del concreto liviano y minimiza la lixiviación de los compuestos solubles. Además reduce la posibilidad del comportamiento dañino de los sulfatos.

Como en todo concreto, es imperativo que las características de la matriz del concreto liviano sean de alta calidad para proteger al acero de refuerzo contra la corrosión, que es el factor dominante en el deterioro estructural observado en la construcción corriente. Los dos mecanismos primarios que protegen el acero contra la corrosión son: por un lado, proporcionando una profundidad de recubrimiento adecuada, hecha con un concreto de buena calidad (relación a/mc apropiada que asegure baja permeabilidad); y por el otro, la capacidad resistente del recubrimiento de concreto. Por lo general, la relación agua eficaz/material cementante es más baja en concretos livianos, a igual tipo de calidad, formándose una pasta con menos poros que una de concreto con densidad normal e igual resistencia. Esto hace que los concretos livianos sean menos permeables que los de densidad normal.

Cuando un concreto liviano emplea alta cuantía de aire y bajo contenido de cemento, la protección del acero se ve reducida significativamente. Por ello, estos concretos

livianos se utilizan para buscar efecto aislante, no estructural, en aplicaciones donde se requiere resistencia térmica.

Por otra parte, los agregados livianos naturales son poco resistentes a la penetración de gases, facilitando la entrada de CO_2 al interior del concreto, lo que genera un mayor riesgo de carbonatación y, en consecuencia, de corrosión del acero. No obstante, a pesar que la NSR-10 no especifica la necesidad de colocar mayores espesores de recubrimiento cuando se usa concreto liviano, es conveniente que los concretos reforzados livianos, hechos con agregados porosos, tengan un mayor recubrimiento, y evitar así que las partículas en contacto con el acero lleguen hasta la superficie del concreto y formen un puente de difusión. Otra alternativa es usar agregados livianos que tengan un tamaño máximo menor al recubrimiento especificado.

10.3.9 Absorción de agua en el concreto liviano

Dado que los concretos livianos contienen más poros que el concreto de densidad normal, pueden absorber más humedad en contacto directo con el agua. La absorción de los concretos livianos puede llegar a ser entre el 12% y el 22% en volumen, mientras que en un concreto con densidad normal correctamente dosificado y bien compactado, puede llegar a ser del 12% en volumen.

No obstante su gran capacidad de absorción, los concretos livianos no son más permeables que los concretos con densidad normal. Esto se debe a que la resistencia del concreto a la penetración del agua depende principalmente de la calidad del mortero, y no de la porosidad, ni la estanqueidad de los agregados. También, a la menor relación agua eficaz/material cementante en los concretos livianos. Algunos ensayos muestran cómo los concretos livianos tienen una penetración de agua similar, e incluso menor, que los concretos con densidad normal e igual resistencia.

10.3.10 Resistencia al fuego

En general, el concreto liviano tiene mayor resistencia al fuego que uno de densidad normal, debido a sus bajos valores de conductividad térmica y coeficiente de expansión térmica. Además, por la inherente estabilidad al fuego de los agregados, elaborados a temperaturas cercanas a los $1.100\text{ }^\circ\text{C}$.

La resistencia de cualquier concreto disminuye con la exposición a altas temperaturas, siendo más grave la reducción en la resistencia del acero cuando este se calienta. El acero, aumenta su volumen

produciendo grietas y descascaramientos en el concreto, lo cual empeora al disminuir las secciones resistentes del concreto y la pérdida de adherencia entre el concreto y el acero. Por ello, la mayor protección al fuego se dará cuando se aumenta el recubrimiento.

Caso particular se presenta cuando el concreto con densidad normal se elabora con agregados de cuarzo y se somete a altas temperaturas (cercanas a los $600\text{ }^\circ\text{C}$), pues su estructura cristalina varía haciendo que experimente un fuerte aumento de volumen. Como consecuencia, se tiene la formación de grietas, descascaramientos y pérdida del recubrimiento de la armadura, quedando expuesta directamente al fuego, pudiendo incluso llegar al colapso del elemento.

Por lo anterior, un mejor desempeño al fuego del concreto se logra con el empleo de agregados livianos. En la Figura 10.4, tomada del Comité ACI 213, se comparan los valores correspondientes a ambos concretos. De la gráfica se deduce que el espesor necesario de una placa de concreto liviano, es menor en aproximadamente un 20% al que tiene densidad normal en el mismo tiempo de resistencia al fuego. Esto permite reducir el espesor del elemento del concreto y, con un recubrimiento estándar, proteger al acero contra el fuego.

Además, un menor espesor de losas permite ganar altura útil en un edificio y menor peso muerto, lo que se traduce en mayor economía de la estructura.

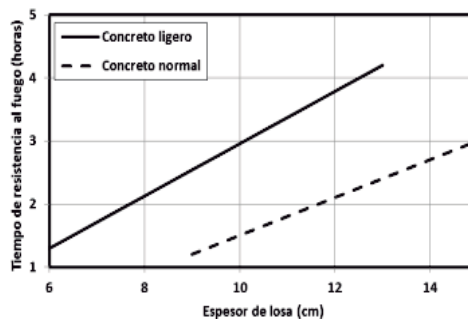


Figura 10.4. Duración de la resistencia contra incendios en función del espesor de la losa para concreto liviano y de densidad normal (10.2)

La NSR-10, en el Título J de protección contra el fuego, especifica cómo calcular, a tiempos de exposición similares, los espesores mínimos de algunos

elementos estructurales, cuando se incluye el uso de concreto con agregados livianos, tal como se muestra en la Tabla 10.3.

Tabla 10.3. Espesor mínimo de losas, muros y columnas, cuando se usa concreto reforzado con agregados livianos (10.8)

Dimensión mínima de columnas de concreto, para resistencias iguales o mayores a 1h, dadas en cm					
Tipo de Agregado	Resistencia al fuego (horas)				
	1	1 1/2	2 ^A	3 ^A	4 ^B
Silíceo	20	23	25	31	36
Calcáreo	20	23	25	30	31
Liviano	20	22	23	27	31
Notas:					
^A Las dimensiones en estas columnas de la tabla se podrán reducir a 20 cm para columnas rectangulares de concreto que tengan dos lados paralelos de, al menos, 95cm de longitud cada uno					
^B Las dimensiones en esta columna de la tabla se podrán reducir en 25 cm para columnas rectangulares de concreto que tengan dos lados paralelos de, al menos, 95 cm de longitud cada uno.					
Espesor mínimo de muros y losas de concreto, para resistencias iguales o mayores a 1 hora, dadas en cm.					
Tipo de Agregado	Resistencia al fuego (horas)				
	1	1 1/2	2	3	4
Silíceo	9	11	13	16	18
Carbonato	8	10	12	15	17
Finos livianos	7	8	10	12	14
Gruesos livianos	6	8	9	11	13
Nota: Para muros o losas aligeradas, con perforaciones de sección transversal constante en toda la longitud, el espesor se calcula dividiendo el área neta de la sección transversal del panel (área de la sección trasversal menos el área de las perforaciones) entre su ancho.					

El mejor desempeño del concreto con agregados livianos tiene como consecuencia que, para igual requerimiento al fuego, se tendrá una menor elevación de la temperatura en el interior de los elementos estructurales. Cuando se tiene un coeficiente de dilatación térmica pequeño y un módulo de elasticidad bajo, se llega a tensiones térmicas menores, evitando el peligro de la formación de grietas y descascamientos.

Los daños por fuego en los concretos livianos solamente ocurren cuando el concreto se encuentra bastante húmedo (mayor a 5% en peso), casos en los que las partículas de agregado y concreto pueden ser lanzadas como proyectiles. Este comportamiento se debe al agua contenida en los poros de

los agregados que se evapora a temperaturas elevadas, creándose altas presiones y la evacuación de vapor al exterior. En el caso de concreto de densidad normal, este caso no se presenta.

10.3.11 Resistencia al desgaste

Ensayos obtenidos en Europa corroboran que la resistencia al desgaste es menor en el concreto liviano, que en el de densidad normal, debido justamente a la baja resistencia al desgaste que presentan la mayoría de los agregados livianos. Las pruebas por fricción arrojan que el concreto liviano tiene un desgaste entre 2 y 5 veces mayor al de un concreto de densidad normal.

La pérdida del concreto por abrasión, disminuye al aumentar la resistencia a la compresión, tanto para el liviano como a el que tiene densidad normal. Con el fin de subsanar este trance, en Estados Unidos y Canadá, aplicados en pavimentos y losas de puentes con circulación de tráfico pesado, se añade sobre el concreto con agregados livianos una capa de desgaste, elaborada con agregados resistentes a la abrasión.

10.3.12 Reacción álcalis - sílice

En general, las pruebas realizadas en laboratorio, al igual que el seguimiento a estructuras en servicio de concretos livianos elaborados con agregados producidos industrialmente, no evidencian deterioro debido la reacción entre el cemento y la sílice reactiva. La explicación se debe a que los agregados livianos, como arcillas, esquistos y pizarras expandidas, no contienen sílice reactiva y, como se explicó, algunos tienen un polvillo fino con características puzolánicas que ayudan a mitigar los efectos de la reacción.

No obstante, cuando se usa agregado liviano natural o escorias expandidas, por tener origen volcánico los primeros, y contenidos de sílice amorfa los segundos, habrá un alto potencial reactivo y, por tanto, deben ser evaluados antes de su uso en el concreto.

10.4 Criterios de dosificación del concreto liviano

Al igual que el concreto de densidad normal, la dosificación de mezclas de concreto liviano se determina por la selección más práctica y económica de los materiales disponibles, con el fin de producir el concreto con las propiedades físicas requeridas.

Los materiales constitutivos del concreto liviano son los mismos del concreto de densidad normal: materiales cementantes, agregados, agua, aire y aditivos, cuya combinación óptima debe conducir al desarrollo de las propiedades en estado fresco y endurecido solicitadas en el proyecto. Por ello, es necesario conocer las propiedades de los materiales, su cumplimiento con las normas y los efectos en el concreto.

10.4.1 Criterios para el proporcionamiento

En el diseño de mezclas de concreto liviano estructural, generalmente se especifica, en orden de importancia:

- Resistencia a la compresión, $f'c$.
- Densidad de equilibrio, w_c .
- Densidad en estado fresco.

- Resistencia a la tracción o hendimiento, si fuera especificada $f'ct$.
- Máximo valor de asentamiento (Cono de Abrams).
- Resistencia a la flexión, sólo para ciertas aplicaciones.

Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión debe ser especificada por el calculista. Generalmente se establece entre 21 y 35 MPa (3.000 y 5.000 psi) y, aunque con menor frecuencia, se especifican valores de 48 MPa o más. Los diferentes tipos de agregados livianos disponibles, no siempre producen resistencias a la compresión similares en el concreto, para un mismo asentamiento y contenido de cemento. Algunos agregado livianos están en capacidad de producir altas resistencias, teniendo cuidado de usar solo agregados livianos clasificados como estructurales, es decir, que cumplan con la norma NTC 4045 (ASTM C330).

Densidad

La densidad es un aspecto muy importante en el proporcionamiento de mezclas de concreto liviano, no solo porque se debe cumplir con la especificación, sino por la influencia desde el punto de vista económico.

En el concreto liviano la densidad de equilibrio depende, fundamentalmente, de la cantidad y densidad aparente de los agregados, es decir, de las proporciones de agregado de densidad normal y liviano. También influyen los contenidos de cemento, agua y aire. La densidad del concreto se puede mantener dentro de los límites solicitados, mediante el ajuste de las proporciones de los agregados de peso liviano y normal.

Un aspecto importante para tener en cuenta en la fabricación de concreto liviano es la relación entre la densidad suelta y la densidad aparente. En el método volumétrico, que determina la cantidad de agregado liviano, se utiliza la densidad aparente, mientras que el pedido del material se solicita por m^3 .

La evaluación apropiada que determina las diferencias fundamentales del concreto hecho con distintos agregados, solo se puede

hacer por comparación del concreto con la misma resistencia a la compresión y la misma densidad de equilibrio. En sitios donde se dispone de una única fuente de agregados, el productor de concreto solo requiere determinar la densidad del concreto que satisfaga la economía y las propiedades físicas de la estructura.

Módulo de elasticidad

Como ya se explicó, aunque no es usual especificar el módulo de elasticidad, su valor debería estar disponible, dada la importancia en el desempeño de las estructuras.

Aire Incorporado

En la Tabla 10.4 se enseñan los rangos de contenido de aire total recomendados por el ACI para concreto liviano. Se debe tener cuidado en no exagerar la cantidad de aire incluido en concretos que tengan grandes volúmenes de agregados livianos. Si bien, esto puede buscar reducir los costos, esta práctica tiene como resultado la disminución en la resistencia, más allá de los rangos recomendados, siendo necesario el incremento de la cuantía de cemento. En el caso de concretos no estructurales o aislantes, los contenidos de aire pueden ser más altos y las densidades más bajas.

Tabla 10.4. Contenidos de aire recomendados para el concreto liviano (10.2)

Tamaño máximo, mm	Cantidad de aire (volumen), %
19	4,5 a 7,5
9,5	6 a 9

Trabajabilidad

Es una propiedad importante del concreto liviano fresco. Al igual que el concreto de densidad normal, el método más usado para su medida es el de asentamiento a través del cono de Abrams. Se recomienda que el valor de asentamiento seleccionado sea lo más bajo posible, de modo que los procesos de colocación, consolidación y terminado del concreto resulten satisfactorios. Se debe medir en el punto de descarga.

Relación a/mc

Cuando el agregado liviano es debidamente pre-humedecido, habrá una mínima cantidad de agua absorbida durante el mezclado y la colocación. Esto permite que el cálculo de la relación a/mc se realice con una precisión similar al concreto de densidad normal.

Si la mezcla es debidamente dosificada, pero a los pocos minutos pierde la trabajabilidad, es posible incorporarle nuevamente agua tratando de recuperarla.

10.4.2 Materiales

Como se mencionó, los materiales que componen el concreto liviano son los mismos del concreto de densidad normal. Se deben realizar pruebas a todos los ingredientes y hacerlas también en el concreto, determinando el desempeño de los materiales a utilizar.

Los cementos y materiales cementantes establecidos en la NTC 121, o las normas ASTM C150, C595, C618 o C1157, se pueden utilizar tal como se especifica en la NSR - 10.

Los agregados livianos usados en el concreto estructural deben cumplir con la NTC 4045 (ASTM C330), tal como establece la NSR-10. Debido a las diferencias en la resistencia de las partículas, los contenidos de cemento necesarios que produzcan una resistencia del concreto específica, varían dependiendo de la fuente de agregados, en particular para concretos con resistencias superiores a 35 MPa (5.000 PSI). Los productores de agregado liviano generalmente recomiendan proporciones de mezcla con contenidos de cemento apropiados, que pueden servir como base en las mezclas de prueba. Los agregados de densidad normal usados en concreto liviano, deben cumplir con la NTC 174 (ASTM C33).

Los aditivos deben cumplir con la NTC 1299 o las especificaciones ASTM correspondientes. También se recomienda seguir las guías y fichas técnicas dadas por los fabricantes para cada producto en particular.

10.4.3 Dosificación y ajuste de mezclas

En general, la dosificación y ajuste de las mezclas de concreto liviano siguen el mismo procedimiento sugerido para las mezclas de densidad normal. Las proporciones finales también deben ser establecidas mediante mezclas de prueba en el laboratorio debidamente ajustadas, que hagan mezclas prácticas en la obra. La consulta al productor de agregados resulta aconsejable para asesoría de dosificación de proyectos específicos.

En particular, se puede aplicar el método del volumen absoluto descrito en el Capítulo 8, en el que el volumen de concreto fresco producido por cualquier combinación de materiales, se considera igual a la suma de los volúmenes absolutos del material cementante, agregados, agua neta, y contenido de aire. Este método requiere de la determinación de la absorción de agua y la densidad relativa de los agregados. El ACI 211.2, describe en detalle el procedimiento, desarrollando algunos ejercicios prácticos. Puede ser particularmente útil utilizar el concepto que se denomina factor de gravedad específica,

el cual relaciona la masa húmeda que tiene el agregado liviano al momento de usarse, con el volumen que ocupan sus partículas. Como depende del contenido de humedad, no es un valor constante y se determina en los agregados livianos al momento de mezclar el concreto usando un picnómetro, o por abacos.

Ejemplo:

Dosificar un concreto liviano por el método de los volúmenes absolutos, usando el factor de gravedad específica.

Tabla 10.5. Ejemplo de dosificación de concreto estructural liviano usando metacaolín como material cementante suplementario

Material	Tipo de densidad		Absorción, o humedad del agregado liviano	Dosificación por peso (base seca), excepto Livitek que está húmedo		Aporte de volumen a la mezcla ²	Notas
	Descripción	kg/m ³		%	kg		
Cemento tipo ART	Aparente	3.150	-	345	0,110	Aporte de volumen a la mezcla: Masa/densidad. La cantidad de agregados se obtiene mediante iteración hasta cerrar el volumen de 1m ³	
Fortacret 10 (Metacaolín de alta reactividad)	Aparente	2.500	-	25	0,010		
Arena de densidad normal - Base seca	Aparente	2.709	1,79	950	0,351		
Grava de densidad normal - Base seca	Aparente	2.776	1,27	114	0,041		
Agua (sin corrección por humedad)	Aparente	1.000	-	210	0,210		
Aditivo plastificante al 50% de sólidos	Aparente	1.100	-	2,0	0,002		
LIVITEK [®] Mortero (0 - 6 mm) - Base seca	Factor de gravedad específica	1.200	15,0	0	0	Aporte de volumen a la mezcla: Masa/factor de gravedad específica. Se escoge un valor para agregados livianos gruesos y finos, y se itera la cantidad de agregados de densidad normal.	
LIVITEK [®] Concreto (6 - 12 mm) - Base seca	Factor de gravedad específica	873	29,52	220	0,252		
Aire incluido (2,5%)	Aparente	0	-	0	0,025	Aire atrapado por mezcla y vibración del concreto	
Densidad en fresco (kg/m³)				1880,9	1 m³	Suma de los componentes secos, más el agua de absorción de agregados de densidad normal. No se incluye la humedad del agregado liviano, pues está contemplada en el factor de gravedad específica.	
Densidad en seco teórica (kg/m³)				1693,3		Suma de los componentes, menos: el agua en los agregados de densidad normal, el agua dentro del agregado liviano, y el componente acuoso del aditivo.	
Densidad de equilibrio teórica (kg/m³)				1743,3		Densidad seca teórica, más 50 kg/m ³	

10.5 Mezclado y transporte

Los principios fundamentales para mezclado y transporte aplican en concreto liviano lo mismo que en el de densidad normal. Los agregados con relativa baja o alta absorción de agua requieren de un manejo acorde con el procedimiento recomendado por el proveedor de agregados y el productor del concreto.

Las operaciones de transporte son similares a las del concreto de densidad normal, solo que por su menor densidad, facilitan la labor de los operarios y de los equipos.

En el caso de bombeo del concreto liviano, se recomienda:

- Pre-humedecer el mayor tiempo posible el agregado liviano antes de realizar la mezcla. Si no se realiza, el agua de mezclado puede ser absorbida durante el bombeo, perdiendo su manejabilidad.
- Mantener como mínimo 335 kg/m^3 de cemento.
- Para facilitar el bombeo, usar un aditivo. Además, ajustar la mezcla disminuyendo el agregado grueso liviano e incrementando el volumen de arena liviana.
- Usar agregados con buena granulometría y adecuada relación agregado grueso/fino.
- Planear diferentes diseños de mezclas, teniendo en cuenta la distancia o la altura desde la bomba hasta el punto de descarga.
- Usar el diámetro de tubería más grande disponible (mínimo 125 mm), sin reducciones.
- Reducir la presión de operación mediante una tasa lenta de colocación, o con el uso de tubería de acero en lugar de caucho.
- Evitar al máximo los empalmes de tubería.

10.6 Colocación

Prácticamente no hay diferencia en las técnicas requeridas en la colocación del concreto normal y liviano. Tal vez la consideración más importante durante el manejo y la colocación, es evitar la segregación entre el agregado grueso y el mortero. En el Capítulo 11 se dan recomendaciones esenciales para el vaciado de mezclas de concreto en general.

Los principios básicos requeridos al momento de hacer una adecuada colocación del concreto liviano, son: una mezcla trabajable con un mínimo contenido de agua; equipo idóneo en el manejo y colocación expedita; consolidación apropiada; y empleo de

mano de obra calificada.

Un concreto liviano bien proporcionado puede ser colocado, extendido y afinado con menos esfuerzo que uno de densidad normal. A veces es necesaria una manipulación adicional durante el terminado, cuando se requiere traer a la superficie una porción del mortero más pesado y del agregado grueso liviano. El desplazamiento del agregado grueso liviano hacia la superficie también puede ocurrir cuando se exceden los límites de asentamiento recomendados.

En el caso de concreto con agregados livianos, se recomienda lo siguiente:

- Usar materiales de buena calidad y debidamente proporcionados.
- Emplear mano de obra calificada y experimentada.
- Adecuada supervisión.
- Asentamiento máximo de 100 mm, aunque con 75 mm se obtienen mezclas cohesivas y con buena manejabilidad; en lo posible limitarlo a 50 mm.
- Usar herramientas adecuadas como las de magnesio o aluminio, que aseguran una superficie tersa sin rasguños ni rasgaduras. Cuando es concreto a la vista.
- Realizar las operaciones de acabado, una vez el agua de exudación haya desaparecido.
- Curar tan pronto se realice el acabado.

El ACI 304.5R, detalla cada uno de los métodos de colocación del concreto, aplicables tanto para mezclas de densidad normal como liviano.

10.7 Control de calidad

El concreto liviano requiere control de los siguientes aspectos específicos:

En planta:

- Conocer el cambio en la densidad aparente, en relación con el contenido de humedad, para ajustar apropiadamente el peso de agregado liviano en la mezcla.
- Para el concreto fresco: contenido de aire, asentamiento y densidad, verificando la conformidad con la mezcla de laboratorio. Es posible recurrir a pequeños ajustes, como:

- En la densidad: si excede de 50 kg/m³, ajustar los pesos cumpliendo con los requerimiento.
- El contenido de aire no debe variar en más de 1,5% del valor especificado, con el fin de evitar efectos adversos en la densidad, la trabajabilidad, la resistencia y la durabilidad.

En obra:

- Densidad del concreto fresco, contenido de aire y asentamiento.
- Elaboración y curado de especímenes para prueba de resistencia.

10.8 Concretos livianos aislantes y de resistencia moderada

En determinadas construcciones, las características acústicas o térmicas son factor determinante en el diseño y en la escogencia del material empleado. Por tal circunstancia, los concretos livianos aislantes y de resistencia moderada constituyen una alternativa versátil muy utilizada.

10.8.1 Definiciones y clasificación

El concreto aislante es liviano, su densidad seca al horno está entre 240 y 800 kg/m³, y la resistencia a la compresión a los 28 días varía entre 0,7 y 7 MPa (7 y 70 kg/cm² o entre 100 y 1.000 psi). Los materiales para su elaboración son los mismos que los de un concreto de densidad normal, solo que, generalmente, no llevan agregados de densidad normal.

Por su parte, el concreto liviano de moderada resistencia tiene una densidad seca al horno entre 300 y 1.900 kg/m³, y una resistencia a la compresión entre 7 y 17 MPa (70 y 170 kg/cm² o entre 1.000 y 2.500 psi). Los concretos livianos aislantes y de moderada resistencia, la PCA los clasifica en 3 grupos relacionados en la Tabla 10.6.

Tabla 10.6. Concretos livianos aislantes y de resistencia moderada

Grupo	Agregados usados	Densidad del concreto, kg/m ³	Usos
I	Agregados expandidos: perlitas, vermiculitas, poliestireno expandido	240 a 800	Aislante térmico o acústico en estructuras como cubiertas, muros y revestimientos de conductos
II	Materiales fabricados expandidos, calcinados o sinterizados: esquisto, pizarra, arcilla, escoria de alto horno, arcilla, diatomita, ceniza volante; o agregados naturales procesados: piedra pómez, escoria o tufa	720 a 1.440	En concretos livianos no estructurales o en concretos livianos de moderada resistencia, dependiendo del agregado empleado y la densidad lograda en el concreto
III	Incorporan una estructura celular obtenida con espuma que sustituyen total o parcialmente los agregados. Pueden ocupar hasta el 80% en volumen	240 a 1.900	Pueden formar concretos celulares para aislamiento térmico o acústico y concretos de moderada resistencia



Figura 10.5. Ejemplo para una capa de nivelación en pisos con agregados livianos †

La Figura 10.5 muestra una aplicación de agregado termo-expandido, para la nivelación de un piso, evitando incrementar, en gran medida, el peso muerto de la estructura.

Los concretos de los grupos I y III, cuya densidad es menor a 800 kg/m³, cuentan con una excelente manejabilidad por la alta cantidad de aire que poseen, logrando asentamientos hasta de 250 mm. Los concretos celulares son más fluidos y se manejan como líquidos, pudiéndose bombear y colocar sin compactación.

10.8.2 Resistencia

La resistencia de los concretos aislantes generalmente no representa mayor importancia. No obstante, para algunas aplicaciones específicas, como las enseñadas en la Tabla 10.7, la resistencia a la compresión se puede determinar mediante el procedimiento dado en la NTC 3802 (ASTM C495), donde se especifica la preparación y ensayo de cilindros moldeados de concreto liviano, de 75 mm de base por 150 mm de altura, para mezclas con una masa de secado al horno que no exceda los 800 kg/m³.

Tabla 10.7. Ejemplos de resistencias para concretos livianos aislantes

Ejemplo de uso del concreto liviano aislante y de resistencia controlada	Resistencia a la compresión, MPa
Aislamiento de tuberías subterráneas con vapor	0,7
Aislamiento de cubiertas	0,7 a 1,4
Rellenos para sub bases de losas sobre terreno y capas de nivelación de pisos	0,7 a 7

10.8.3 Pautas para el proporcionamiento, mezclado y colocación

El proporcionamiento de las mezclas puede requerir de algunos detalles para lograr los fines propuestos específicos; como los siguientes, sugeridos por la PCA:

- La cantidad de agua varía dependiendo de las características de los agregados y el proporcionamiento de los materiales. En cualquier caso, se debe tener cuidado con un exceso porque puede causar una elevada retracción por secado con la consecuente fisuración.

La contracción excesiva puede dañar las membranas de impermeabilización o producir alabeo. En concretos celulares curados en agua pueden llegar a ser entre el 0,1% y el 0,6%. Concretos hechos con perlita o piedra pómez pueden contraerse entre 0,1% y 0,3%, en 6 meses de secado al aire. Concretos con vermiculita pueden contraerse entre 0,2% y 0,45% en 6 meses; Concretos con arcilla térmicamente expandida, se pueden contraer del 0,06 al 0,1% en 6 meses.

- Los concretos del grupo II requieren cuantías de cemento entre 120 y 360 kg/m³, dependiendo de las proporciones de la mezcla y la granulometría de los agregados. El contenido de aire puede alcanzar hasta el 25% y el 35% en volumen.
- Los concretos sin finos que contienen piedra pómez, escoria expandida o esquistos expandidos, se producen con una cuantía de agua entre 150 y 170 kg/m³, un total de vacíos entre 20% y 35%, y contenidos de cemento hasta los 280 kg/m³.

Por la escasa resistencia de los agregados del grupo I, se deben evitar prolongados tiempos de mezclado, evitando así que se rompan, con el consecuente cambio en la densidad, granulometría y manejabilidad.

Se pueden utilizar diversos medios en la colocación, pero el más empleado habitualmente es el bombeo, requiriendo para su terminado tan solo la pasada con una llana.

10.8.4 Protección acústica

La protección acústica es de particular interés en la construcción, cuando se trata de dos espacios distintos, donde se quiere que los sonidos producidos en uno de ellos no se transmitan al otro. Para ello se define la "Pérdida de transmisión de sonido" o "aislamiento del sonido transmitido por el aire", como la diferencia entre la energía sonora incidente y la transmitida, medida en decibeles (dB), que para el caso específico de viviendas, puede ser entre 45 y 55 dB.

Así mismo, la absorción del sonido es diferente a la pérdida de transmisión. Un concreto de peso liviano, tipo poroso, presenta buenas propiedades absorbentes del sonido pero con muy alta transmisión. No obstante, esto se subsana sellando la fuente en su lado lejano de modo que la parte porosa absorba el sonido (aislándolo) y así, el costado sellado aumenta la pérdida de transmisión.

El tamaño y disposición de las cavidades dentro del concreto también son importantes. Por ejemplo, el concreto celular que cuenta con burbujas discretas de aire, mues-

tra menor absorción de sonido, que el concreto hecho con agregado poroso de peso liviano.

10.8.5 Conductividad térmica

La conductividad térmica de un material se refiere a la capacidad para transmitir calor. Está definida como la relación del flujo de calor respecto al gradiente de temperatura.

La medida se hace en Jules por segundo, por metro cuadrado del área del cuerpo, cuando la diferencia de temperatura es de 1°C, por metro de espesor del cuerpo.

La conductividad térmica varía con la densidad y las condiciones del material (como el grado de humedad, la composición y la temperatura en la que se realiza la medición, entre otras). En el caso del concreto de densidad normal, la densidad no afecta considerablemente este coeficiente, siendo su valor, cuando se encuentra saturado, entre 1,4 y 3,6 J/m²s °C/m, dependiendo de su composición. No obstante, para el caso del concreto liviano, la conductividad térmica sí se afecta con la densidad, debido fundamentalmente a la baja conductividad del aire.

En la Figura 10.6 se muestra la relación entre la masa volumétrica (densidad) del concreto y la resistencia térmica. Se aprecia cómo la resistencia térmica aumenta de manera exponencial con la disminución de la densidad. La norma ASTM C177, detalla el procedimiento y fija las condiciones para su medición.

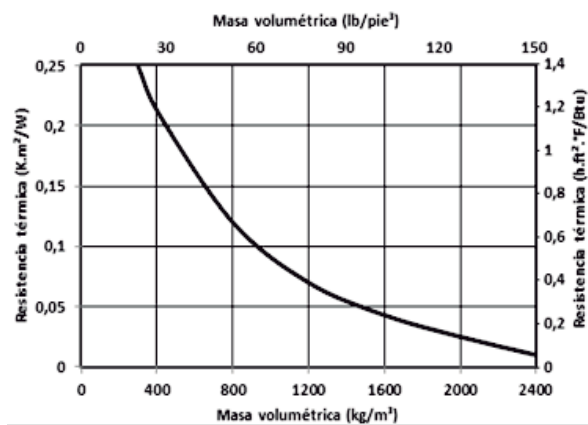


Figura 10.6. Resistencia térmica y densidad del concreto (10.7)

Para propósitos de aislamiento térmico, estructuras que pueden alcanzar los 950°C, Neville sostiene que se puede hacer concreto con agregado liviano, y una densidad entre 500 y 1000 kg/m³, alcanzado una conductividad térmica entre 0,21 a 2,29 J/m² °C/m.

Otra forma de lograr aislamiento térmico y acústico es utilizando mezclas de concreto liviano, no estructural, sin incorporar finos; permitiendo concretos de baja conductividad térmica y densidades cercanas a 600 kg/m³, tal como se muestra en la Figura 10.7.



Figura 10.7. Ejemplo de un concreto liviano, sin finos, para protección térmica. Cortesía Constructora Conconcreto

10.9 Referencias y bibliografía recomendada

10.1 ACI 211.2 - 98 Práctica para la elección de las proporciones de concreto estructural liviano. ACI. Farmington Hills, 1.998.

10.2 ACI 213 Guía del concreto estructural con agregado liviano. ACI. Farmington Hills, 1.999.

10.3 ACI 304 Guía de dosificación, mezcla, transporte y colocación del concreto. ACI. Farmington Hills, 2.000.

10.4 INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. NTC 4045 Agregados livianos para concreto estructural. ICONTEC, Bogotá, 1997.

10.5 NEVILLE A.M. Propiedades del concreto. IMCYC, México D.F. 1999.

10.6 WEIGLER – KARL. Hormigones ligeros armados. Editorial Gustavo Gili. Barcelona, 1974.

10.7 PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Diseño y control de mezclas de concreto. PCA. Skokie, Illinois, 2.004.

10.8 ASOCIACIÓN DE INGENIERÍA SÍSMICA. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR -10. Bogotá, AIS, 2011.

11

Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto

Las acciones para el manejo de los materiales, el mezclado, colocación y terminado del concreto son fundamentales para asegurar la calidad del concreto

El paso que sigue al diseño y ajuste de la mezcla es su producción y construcción de la estructura. Como procesos intermedios a la puesta en obra se encuentran el transporte, la colocación, la compactación y el terminado. Cada proceso es importante para el cumplimiento final de las especificaciones. Se han desarrollado diversas maneras para realizar los procesos mencionados. Así mismo, existe bastante literatura que trata a profundidad cada tema. El presente capítulo muestra las técnicas corrientes y básicas de cada uno, resaltando las ventajas, las limitaciones, el tipo de obra donde se recomienda y la normativa aplicable.

Dentro de los temas tratados en este capítulo figuran las recomendaciones sobre:

- Manejo y almacenamiento de los materiales.
- Tipos, capacidad y mantenimiento de las mezcladoras.
- Plantas de elaboración y sistemas de plantas dosificadoras.
- Sistemas de alimentación a los dosificadores.
- Dosificación de los ingredientes y sus tolerancias en dosificación.
- Orden de llenado a la mezcladora y tiempo de mezclado.
- Sistemas de transporte y manejo del concreto.
- Preparación de formaletas y control previo a la colocación.
- Métodos de colocación, compactación y terminado del concreto.

11.1 Manejo y almacenamiento de los materiales

Con el manejo y almacenamiento en la planta de los materiales que componen el concreto se da inicio a la producción, proceso que requiere especial atención, pues resulta innocuo recibir materiales con buenas características, si estas son alteradas por un manejo inadecuado o un almacenamiento deficiente. Para su recibo, se deben comprobar los datos remisorios para evidenciar su calidad, posibles faltantes o contaminación.

El almacenamiento se hace acorde con el tipo de material, sus características, presentación y los volúmenes que se manejarán, buscando siempre que las propiedades no se alteren. Las siguientes son algunas de las prácticas recomendadas.

11.1.1 El cemento

Las acciones para el manejo y almacenamiento del cemento deben estar encaminadas a que no se envejezca ni se hidrate. Las medidas a tomar dependen de cómo se encuentre empacado, es decir, si está en sacos o a granel.

Cemento en sacos

Normalmente, se hace en bodegas que tengan características como las mostradas en el esquema de la Figura 11.1:

11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto

- Las paredes no deben admitir humedad ni filtraciones. Debe contar con ventilación adecuada, que permita la circulación del aire y no se condense la humedad.
- El techo debe ser impermeable, con pendiente suficiente que asegure el adecuado drenaje de la lluvia, con aleros de, al menos, 80 cm.
- Para obras de cierta duración, en ambientes húmedos, las paredes deben ser dobles, de ser posible.
- Preferiblemente, el piso debe tener tablonces y estar separado del suelo natural por lo menos 20 cm, para evitar el paso de la humedad a las bolsas de cemento.

Cuando el almacenamiento es inferior a un mes, se recomienda que el apilado de los sacos sea en columnas hasta de 12 unidades, evitando el contacto con las paredes. Cuando el almacenamiento sea alrededor de dos meses, es aconsejable formar pilas no superiores a siete bultos, cubriéndolas con lonas impermeables. El almacenamiento de sacos en muchas pilas, durante largo tiempo, puede causar compactación en los bultos inferiores.

Es conveniente consultar al fabricante sobre las condiciones y tiempo de almacenamiento, pues dependiendo del tipo de cemento y las propiedades del empaque, el tiempo de almacenamiento se puede reducir.

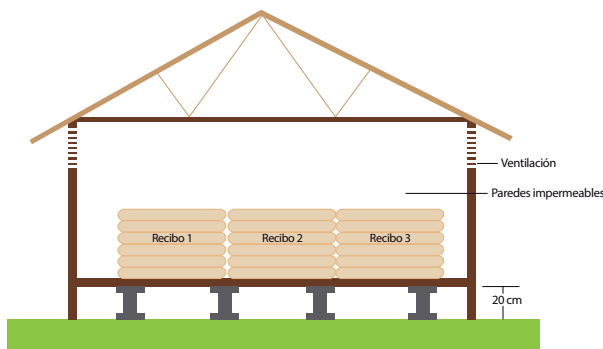


Figura 11.1. Esquema recomendado de una bodega para almacenar cemento*

El empleo del cemento debe ser cronológico, por orden de llegada, usando el sistema FIFO (*first in first out*) o PEPS (primero que entra es lo primero que sale).

Antes de usarlo, se debe verificar que no tenga grumos. Si los hay, confirmar que se pueden deshacer

con una presión baja utilizando los dedos índice y pulgar. Si presenta cierta resistencia, o no se pueden deshacer, significa que el cemento posiblemente se encuentra parcialmente hidratado o compactado. Cuando se tiene esta situación, se recomienda que, antes de usarlo, se hagan pruebas de fraguado y resistencia para comprobar sus propiedades. Si las pruebas arrojan resultados favorables, se debe tamizar el cemento afectado y utilizarlo de inmediato. De lo contrario, desecharlo para uso en el concreto.

Cemento a granel

El almacenaje del cemento a granel normalmente se hace en silos (Figura 11.2). Al emplear simultáneamente distintas clases de cemento, se recomienda disponer un silo para cada tipo, con una capacidad mínima de 50 toneladas, teniendo en cuenta que los contenedores transportan alrededor de 30 toneladas, de modo que la planta disponga de un remanente y no se desabastezca.

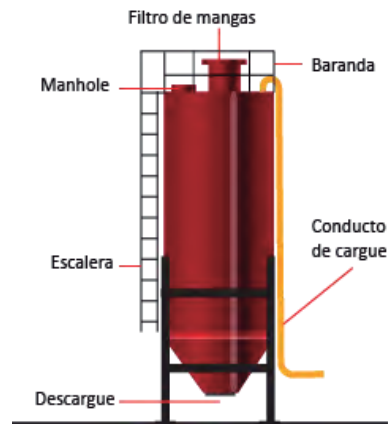


Figura 11.2. Esquema general de un silo para almacenar cemento a granel en la planta productora de concreto*

Los silos en su interior deben ser lisos, con mínimas costuras, soldaduras o remiendos. La sección transversal generalmente es circular, pero puede ser también rectangular. En la parte inferior cuenta con un tronco de cono que facilita el descargue. El silo circular debe tener una inclinación mínima de 50 grados respecto de la horizontal; y en el rectangular, la inclinación debe estar entre 55 y 60 grados. Los silos no deben tener orificios,

porque permiten que la humedad penetre y forme costras de cemento endurecido, que al desprenderse, bloquean el sistema de dosificación y pueden dañar el equipo de mezclado.

El descargue del cemento desde el camión contenedor (pipa) se hace neumáticamente, utilizando un compresor. Ello implica que el silo debe disponer de un filtro de mangas, para que el aire salga y evite que el cemento se escape. El filtro debe limpiarse o cambiar con cierta frecuencia, para impedir su taponamiento.

Por lo general, cuando se traslada cemento desde el silo hasta la báscula de dosificación, se hace por gravedad, o por medio de tornillos sin fin. Cuando se dispone de varios silos, debe disponerse de conexiones separadas.

Es recomendable realizar un mantenimiento periódico del silo. Para el efecto, se vacía y se accede al interior a través de la compuerta (*manhole*) ubicada en la parte superior. Se tapan los agujeros que pueden permitir filtraciones, se desprenden y se sacan las partes hidratadas (costras de cemento), se limpian las mangas del filtro y se limpia la compuerta de descargue.

11.1.2 Los agregados

Las operaciones indebidas en el manejo y almacenamiento de los agregados en la planta pueden afectar su gradación, uniformidad en el contenido de humedad, limpieza y forma. Las siguientes recomendaciones pueden resultar apropiadas:

- Situar lo más próximo posible a la planta dosificadora el patio de almacenamiento de los agregados, para evitar transporte interno excesivo que pueda fragmentar las partículas, alterando su granulometría.
- Almacenar por separado los agregados de diferente tamaño. Lo ideal es agruparlos por cada tamaño en particular. Se acostumbra hacerlo solo en dos grupos: arena y grava. En plantas de producción de concreto a escala industrial, es factible lograr el almacenamiento en varios tamaños.
- Evitar montones de forma cónica pues tienden a segregarse el material. Se aconseja formar capas horizontales con taludes 3:1 (horizontal - vertical).
- Proteger la arena seca del viento, evitando su segregación y la pérdida de material fino.

- Trasladar los agregados utilizando cargador frontal. No arrastrarlos con buldócer.
- Evitar el tránsito de camiones y cargadores sobre las pilas de agregados, toda vez que ocasionan su rotura y contaminación.
- Procurar que, cuando el almacenamiento se haga en tolvas, estas tengan la menor sección transversal posible, y sus paredes de fondo dispongan de una pendiente superior a los 50 grados (respecto a la horizontal), para facilitar su manejo.
- Drenar la arena por lo menos 24 horas, para que adquiera un contenido uniforme de humedad.
- Regar los caminos próximos a las pilas, evitando el levantamiento de polvo y que el agregado se contamine con material fino. En el argot ecológico o del medio ambiente, el polvo levantado de las vías se conoce como “emisiones fugitivas”, considerado como un causante de contaminación ambiental.
- Evitar que los agregados caigan libremente desde una altura que los pueda romper y segregar.

Además, se debe realizar el almacenamiento en patios apropiados, que en general cumplan con las siguientes características:

- El piso debe ser duro, de preferencia en concreto o suelo-cemento.
- Con muros divisorios para evitar mezclas entre las pilas de diferente granulometría.
- El piso debe tener una pendiente apropiada, para lograr una humedad uniforme en las pilas, especialmente en la arena.
- Que su diseño permita utilizar el material por el sistema PEPS (FIFO).
- El piso debe encontrarse limpio, libre de vegetales, polvo, materia orgánica, partículas deleznable y cualquier otro elemento que pueda contaminar el agregado.

La Figura 11.3 del ACI 304R, ilustra algunos aspectos adicionales relacionados con el manejo y almacenamiento de los agregados.

11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto



Preferible:

Colocar los materiales en unidades no mayores que la capacidad de un camión, de tal forma que no requieran transporte posterior, ni rueden por la pendiente de las pilas. Para ello, es adecuado emplear gruas o equipos similares.



Objetable:

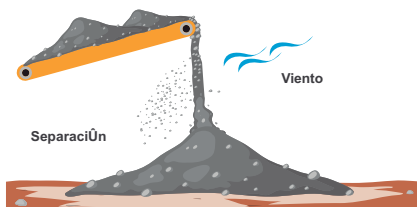
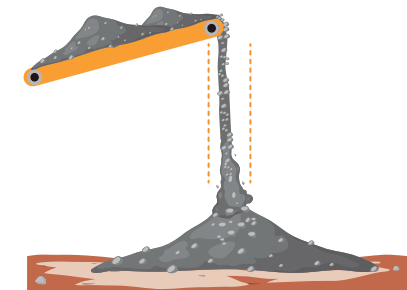
Emplear métodos que impliquen la descarga de camiones en la pendiente de la pila o un talud; o el paso de los equipos por la misma zona de la pila.



Son aceptables con limitaciones, pero generalmente pueden ser objetables:

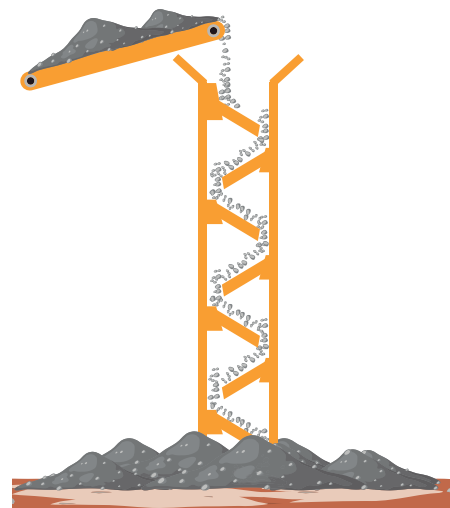
Las pilas conformadas en capas horizontales, distribuyendo radialmente el material que es alimentado por una banda transportadora. A veces se necesita el uso de dispositivos para evitar la segregación, como pueden ser los tubos (ver abajo). Las pilas en capas sucesivas, conformadas con buldozer, y con pendiente no mayor de 1:3; si los materiales no son muy resistentes, puede presentarse rotura excesiva.

Almacenamiento de agregados finos no tamizados, (materiales secos)



La caída libre del agregado fino desde el extremo de una banda transportadora puede ocasionar que el viento arrastre los materiales más finos.

Almacenamiento de agregados gruesos tamizados



Para evitar la rotura excesiva de los agregados que caen del extremo de una banda transportadora puede requerirse el uso de un tubo escalonado.

Figura 11.3. Recomendaciones para el manejo y almacenamiento de los agregados (11.1)*

11.1.3 Los aditivos

Los aditivos también requieren de un manejo y almacenamiento adecuado. Las siguientes recomendaciones generales están basadas en el reporte del Comité ACI 212, y brindan una buena idea al respecto.

- Mantenerlos siempre en su envase original o en aquel que es suministrado por el fabricante para su almacenamiento y dosificación en planta. Los aditivos líquidos deben permanecer en tambores o tanques cerrados herméticamente. Además, se debe proveer a los tanques de un sistema de paletas, o de cualquier otro, que proporcione agitación o mezcla del material, de modo que se mantengan los sólidos en suspensión y se asegure un material homogéneo en todo momento.
- Almacenarlos bajo techo. Su exposición a temperaturas extremas provoca el deterioro. Protegerlos de las bajas temperaturas. Algunos requieren de temperaturas mínimas de almacenamiento.
- Es importante mantener registros con las fechas de producción y vencimiento. Los fabricantes pueden brindar indicaciones precisas sobre los productos, en cuanto a afectación por un almacenamiento prolongado. De ser necesario, realizar pruebas previas al uso en concreto.

La Figura 11.4 muestra un esquema de almacenamiento y dosificación de aditivos en una planta de concreto premezclado.

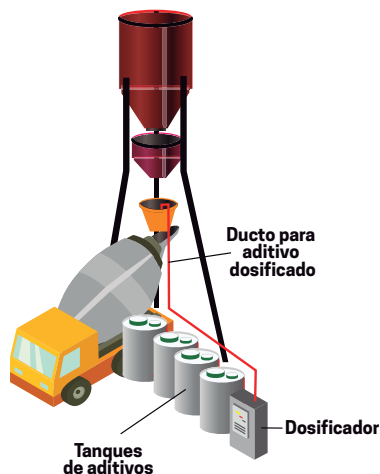


Figura 11.4. Esquema general del sistema de almacenamiento y dosificación de aditivos en una planta de concreto*

11.1.4 Los cementantes complementarios

Los cementantes complementarios tienen un manejo similar al cemento. Muchos de estos no se alteran al estar en contacto con el agua (por ejemplo el metacaolín, o la microsílíce), pero otros sí pueden presentar reacciones químicas cuando se humedecen (Cenizas volantes de alto calcio, escorias) y cambiar sus características. Por ser un cementante, se deben tener las mismas precauciones que el cemento, evitando la alteración de sus propiedades, como:

- Dado que el color de algunos cementantes en polvo es muy similar al del cemento, su manejo y almacenamiento a granel obliga a marcarlos para evitar errores de entregas y mal uso.
- Almacenarlos en bodegas y silos similares a la del cemento, para protegerlos de la humedad.
- Cuando se utilizan tolvas divididas en cementantes complementarios y el cemento, es necesario tomar precauciones en su diseño, construcción y uso, tratando de evitar la contaminación entre los compartimientos.
- Algunos cementantes complementarios pueden estar dispersos en agua, facilitando su manejo. Por ello, los tambores o tanques empleados, deben tener un sistema de agitación, al igual que aquellos donde posteriormente se almacenan.

11.1.5 El agua

Cuando el agua procede del acueducto y se dosifica directamente del grifo, no se requiere de infraestructura para su manejo y almacenamiento. Cuando la planta requiere de tanques o depósitos, se recomienda que:

- Deben estar debidamente diseñados, contruidos y protegidos con el fin de evitar que el agua se contamine. En general, deben tener las mismas características de los tanques de almacenamiento y suministro de agua para consumo humano.
- Pueden estar enterrados, semienterrados o elevados. Su material puede ser acero, concreto o fibrocemento.
- Su localización permita que el suministro se efectúe de modo efectivo.

11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto

- Tengan una capacidad suficiente.

11.2 Plantas de producción

En general, las plantas para producción de concreto, pueden ser: horizontal, radial o estrella y torre. Estas a su vez, pueden ser tan sólo dosificadoras, o bien, dosificadoras y mezcladoras. También se han desarrollado camiones productores de concreto para elaboración y entrega de pequeñas cantidades directamente en la obra.

Las diferencias entre las distintas plantas radican en la disposición dada para el transporte de los materiales

dentro de la instalación, siendo la principal la forma de almacenamiento y la manera del traslado de los agregados al equipo dosificador.

Actualmente, por disposiciones y permisos ambientales, se exige que las plantas dispongan de instalaciones que permitan el reciclaje de agua de lavado de los camiones, así como la recuperación de agregados del concreto sobrante devuelto, o de calidad defectuosa (Figura 11.5).

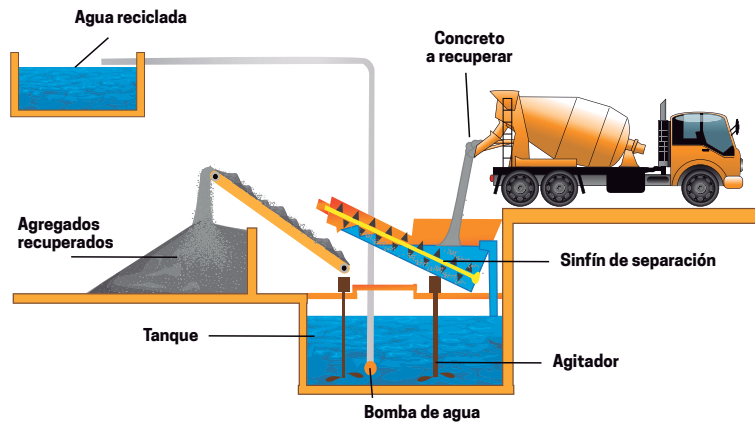


Figura 11.5. Esquema general del reciclaje de agua y agregados*

11.2.1 Planta tipo horizontal

En este tipo de planta, los agregados se manejan con bandas transportadoras dispuestas en forma horizontal o ligeramente inclinadas. Comunican la tolva receptora con los silos de almacenamiento, que a su vez, alimentan los dosificadores (Figura

11.6). Estas plantas se utilizan cuando la distancia desde las canteras de agregados es corta, permitiendo que las volquetas de transporte descarguen directamente en los silos sin necesidad de transporte interno.

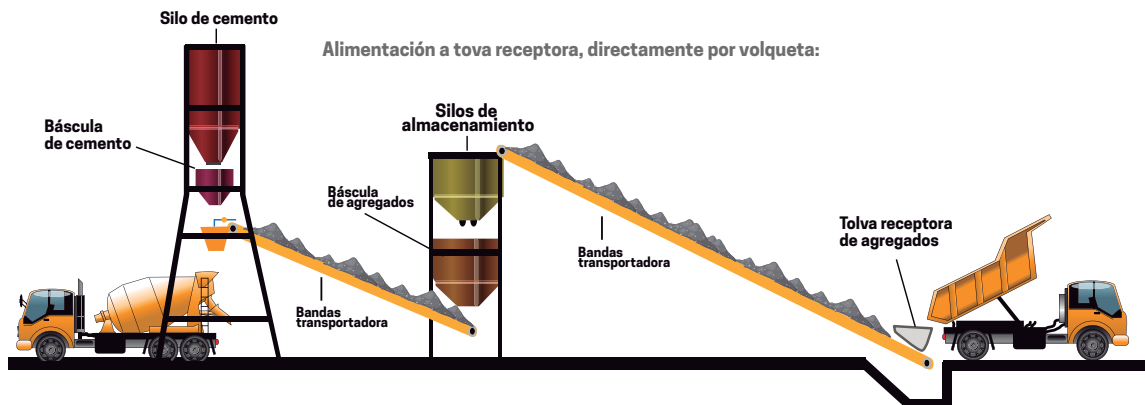


Figura 11.6. Planta tipo horizontal (11.14)*

Alimentación a tolva receptora por cargador frontal

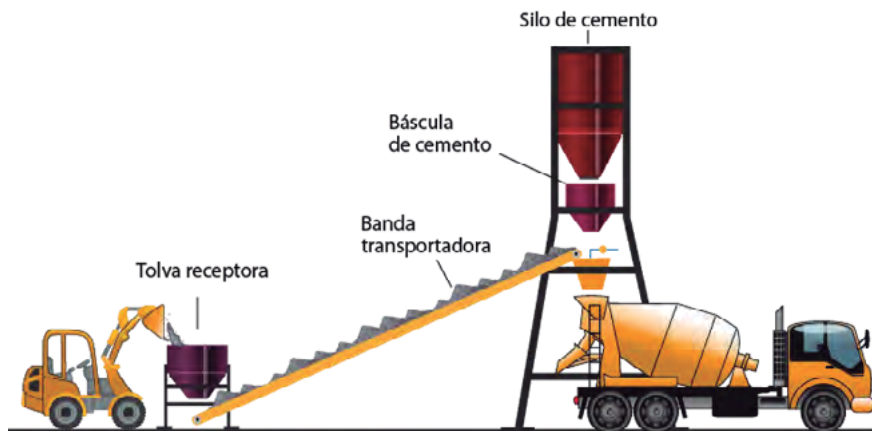


Figura 11.6. Continuación

Cuando la instalación de la planta es de largo plazo, los silos se construyen utilizando una obra civil en concreto. Por el contrario, si se prevé que estará por un corto plazo, con capacidad de almacenamiento y producción intermedia, estas plantas son versátiles, pues los silos normalmente son metálicos, con la ventaja que son fácilmente trasladables.

una draga. Desde allí, y por gravedad, los agregados van a tolvas pesadoras a través de compuertas. Con este sistema, el suministro de agregados se realiza desde la cantera hasta la planta de manera continua, sin requerir patio adicional de almacenamiento, ni tolva receptora.

11.2.2 Planta tipo radial o estrella

Para las plantas tipo radial o estrella, el almacenamiento de agregados se efectúa por tamaños, separándolos por medio de tabiques o muros dirigidos hacia un bastidor central (Figura 11.7). Durante el proceso, las volquetas descargan los agregados dentro del compartimiento correspondiente, y son arrastrados hacia el centro del bastidor mediante

Este tipo de planta puede ser fija o móvil. Para proyectos de corta duración, las divisiones de los compartimientos de la estrella son en madera o concreto prefabricado, soportadas por perfiles metálicos, que sean recuperables. Cuando se trata de instalaciones a largo plazo, las construcciones se hacen por obra civil en concreto.

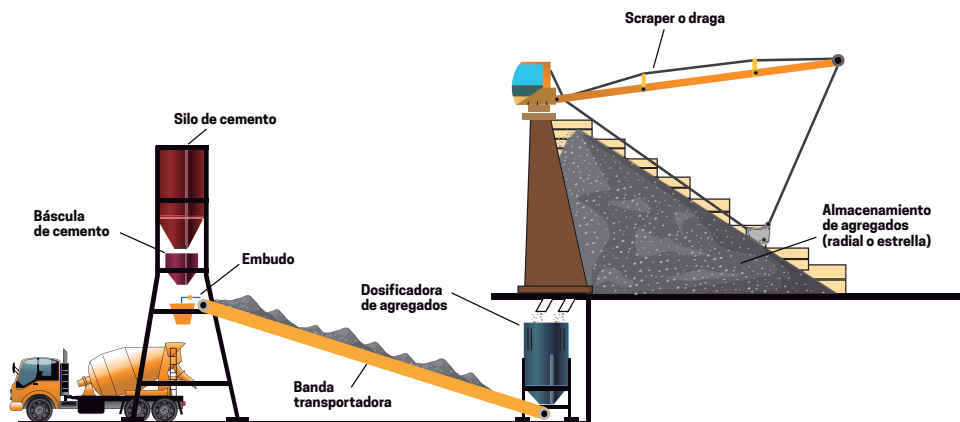


Figura 11.7. Planta tipo radial o estrella (11.14)

11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto

11.2.3 Planta tipo torre

Se caracteriza porque los materiales son conducidos a la báscula de dosificación por medio de elevadores verticales de cangilones, dispuestos en forma de torre (Figura 11.8). El proceso de cargue de los agregados se realiza alimentando una tolva receptora, mediante un cargador frontal, donde son recibidos por una serie de cangilones en la parte inferior del elevador. La descarga en la parte superior se hace por gravedad hacia los silos de almacenamiento, que a su vez alimentan los dosificadores.

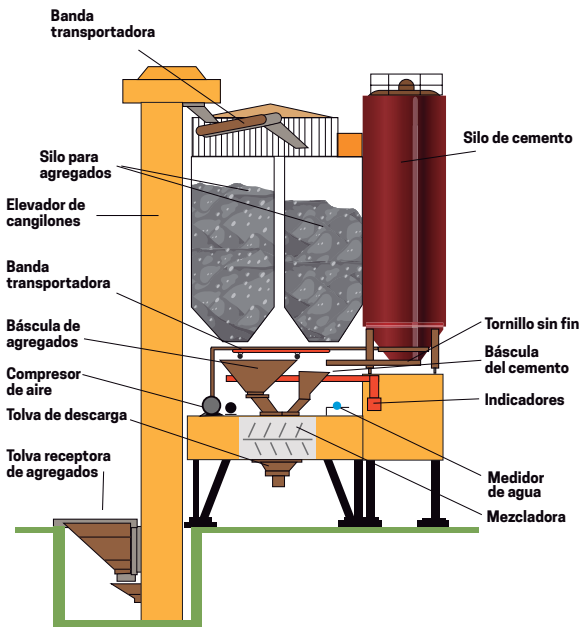


Figura 11.8. Planta de mezclas de concreto tipo torre (11.18)

Por sus características, las plantas tipo torre requieren instalaciones definitivas, lo que sugiere unos costos de instalación más elevados. Por ello se ubican en zonas donde se prevé alta demanda, de forma continua. La autonomía de esta planta depende de su capacidad de almacenamiento en la parte superior, así como la cantidad de materiales que se puedan tener en los patios de almacenamiento auxiliares.

11.2.4 Camiones productores

El concreto también se puede producir en camiones provistos de una mezcladora y una serie de tolvas, donde se almacenan y dosifican los materiales (Figura 11.9). Los camiones tienen la capacidad de producir concreto en el momento mismo de ser re-

querido por la obra, sin demoras. Dado que los materiales solo se dosifican y mezclan al momento mismo de requerirse el concreto, el sistema permite evitar largas distancias de acarreo.



Figura 11.9. Camión productor de concreto⁺

Este procedimiento es muy versátil para producir pequeñas cantidades de concreto. El sistema de descarga permite un ángulo de 180°, con lo que se mejora la distribución en la entrega. La capacidad de descarga es de aproximadamente 7 m³ en 15 minutos, aunque esta cantidad puede variar de acuerdo con el tamaño del equipo.

Se pueden producir concretos con cualquier manejabilidad, sin limitar la descarga a bajos asentamientos. Se limitan a la producción de concretos normales, sin que se puedan producir mezclas de altas exigencias técnicas.

11.3 Dosificación

La dosificación es el proceso mediante el cual se mide cada uno de los materiales que componen la mezcla y su respectiva introducción a la mezcladora, para producir una "bachada". La medida se puede hacer por masa o por volumen. El término "bachada" (mezclada o amasada) se refiere al volumen total de concreto o mortero que está contenido en la mezcladora y que es mezclado en un mismo tiempo.

La producción de concreto de calidad uniforme requiere que sus ingredientes sean medidos con la mayor exactitud posible en cada operación de mezclado. Para ello, la mayoría de las especificaciones establecen

que la dosificación sea realizada en masa. Aunque el agua y los aditivos líquidos pueden ser dosificados en masa o por volumen, se recomienda que su medida sea en masa. La dosificación del cemento debe realizarse en masa.

11.3.1 Equipo de medición

Tal como se muestra en la Figura 11.10, un sistema de medición consta básicamente de una instalación para almacenamiento, generalmente silos, y de un sistema de pesaje (normalmente tolvas pesadoras).

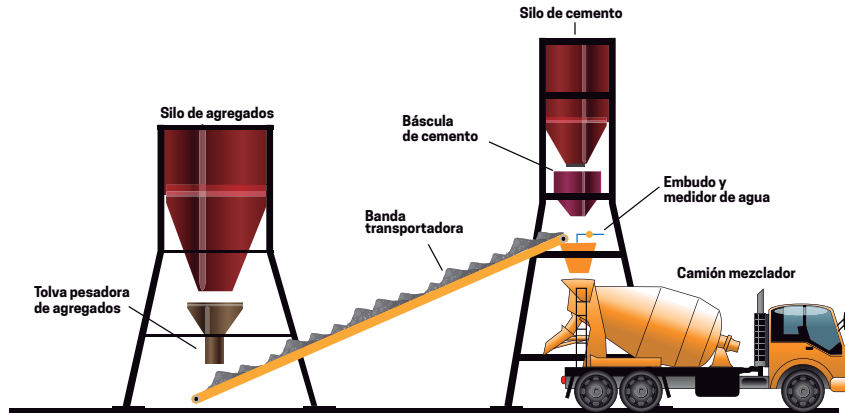


Figura 11.10. Esquema de un sistema de medición (11.6)*

Los silos almacenan los ingredientes por separado, y la medición de las cantidades se realiza individualmente. Además, los silos suelen tener un tamaño tal, que permite alimentar eficazmente la capacidad productora de la planta. La posición del sistema de dosificación no afecta la uniformidad de la mezcla, por la disposición de las tolvas abastecedoras y de las básculas dosificadoras.

El agua se refiere a la cantidad total, es decir, que incluye cualquier agua de lavado. Cuando se dosifique el agua en hielo (forma de escarcha), debe hacerse en unidades de masa. La dosificación del aire incorporado generalmente se hace con una tolerancia de $\pm 1,5\%$. Los cementantes complementarios en polvo deben medirse en masa con una precisión de $\pm 3\%$. Los aditivos líquidos o adiciones en pasta se pueden dosificar en masa o por volumen, con una precisión de $\pm 3\%$.

11.3.2 Tolerancias de medición

La Tabla 11.1 muestra las tolerancias dadas por el ACI 304R para producción de concreto. La frecuencia y el adecuado mantenimiento de los equipos es clave en la medida exacta de los ingredientes.

Tabla 11.1. Porcentajes de exactitud típicos de medición (11.1)

Ingredientes	Dosificación por peso mayores al 30% de la capacidad de la báscula		Dosificación por peso menores al 30% de la capacidad de la báscula	
	Medición individual	Medición acumulada	Medición individual	Medición acumulada
Cemento y otros materiales cementantes	$\pm 1\%$ de la masa requerida o $\pm 0,3\%$ de la capacidad de la báscula, el que sea mayor		No menor que el peso requerido, ni más del 4% del peso requerido	
Agua (por volumen o peso), %	+ 1	No recomendado	+ 1	No recomendado
Agregados, %	+ 2	+ 1	+ 2	+ 0,3% de la capacidad de la báscula o + 0,3% del peso acumulado requerido, el que sea menor
Aditivos (por volumen o peso), %	+ 3	No recomendado.	+ 3	No recomendado

► 11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto

11.3.3 Plantas dosificadoras

En general, los equipos de dosificación se clasifican en tres categorías: manual, semiautomático y automático. Las plantas manuales son utilizadas en trabajos pequeños, con una producción menor a 240 m³, a razón de 15 m³/h (2 turnos de 8 horas) pero la tendencia es la de automatizar las operaciones.

En el sistema de dosificación semiautomático, las compuertas de las tolvas de los agregados para cargar las tolvas pesadoras se operan manualmente mediante interruptores de presión, que se cierran automáticamente cuando el peso estipulado del material ha sido medido. El sistema cuenta con interruptores que impiden que la carga y la descarga de la dosificadora ocurran simultáneamente; o sea que cuando la tolva pesadora se está cargando, el sistema no puede ser descargado, y viceversa.

En el sistema automático, todos los materiales se manejan mediante un panel de control, en el que la mayoría tiene sistematizado el diseño. También cuentan con selectores para medir el volumen de la mezcla, la humedad del agregado fino, compensadores de humedad del agregado y dispositivos gráficos o digitales para registrar el peso de cada material.

11.3.4 Alimentación a los sistemas de dosificación

El proceso de alimentación a las básculas se realiza de acuerdo con el material que se dosificará y la forma como se encuentre almacenado. En el caso del cemento a granel y los cementantes complementarios, el traslado se puede efectuar por dos métodos: por gravedad o mediante tornillo sin fin. El primero se utiliza cuando el silo está encima de la báscula y el material cae mediante la gravedad a través de un mecanismo de cierre. El segundo se usa cuando el silo está debajo de la báscula o a la misma altura.



Figura 11.11 Tornillo sin fin
Cortesía: Luis B Gonzalez y Juan Esteban Ospina

El tornillo sin fin consiste en un tubo, en cuyo interior tiene un sistema helicoidal encargado de empujar con sus roscas el material desde el silo hasta la báscula (Figura 11.11).

El suministro del agua generalmente procede directamente del acueducto. Se realiza por medio de una tubería provista de un contador automático, con el que se asegura una dosificada exacta. Cuando el agua se alimenta desde un tanque construido en la planta, el suministro se efectúa mediante una bomba, a través de un sistema electromecánico que corta instantáneamente el suministro cuando se completa la cantidad establecida.

Los aditivos líquidos se trasladan desde el tanque de almacenamiento hasta el dosificador de agua (o directamente a la mezcladora) mediante una bomba. Cuando se emplean surtidores controlados por reloj, se hace una comprobación mediante tubos de inspección visual.

El traslado de los agregados a los sistemas de dosificación se realiza tal y como está descrito en el numeral 11.2.

11.4 Mezclado

El mezclado es el proceso de revolver los ingredientes, buscando cubrir la superficie de todas las partículas del agregado con pasta de cemento y hacer una masa uniforme.

Para la obtención de un concreto uniforme es esencial un mezclado completo, razón por la cual el equipo y los métodos empleados deben estar en capacidad de mezclar eficazmente los materiales. Es decir, la elaboración de un concreto de calidad exige disponer de instalaciones bien equipadas, controladas y mantenidas.

Uno de los métodos para comprobar si el concreto está bien mezclado, consiste en tomar muestras de diferentes porciones de una bachada. Si estas porciones tienen esencialmente la misma densidad, contenido de aire, asentamiento y contenido de agregado grueso, entonces se tiene una masa uniforme. La Norma NTC 3318 establece que el concreto es uniforme cuando cumple con cinco de los seis ensayos relacionados en la Tabla 11.2.

Tabla 11.2. Requisitos para verificar uniformidad del concreto (9.19)

Ensayo	Requisito expresado como la máxima diferencia permitida en resultados de ensayos de muestras tomados en dos sitios en una batchada de concreto.
Masa por m ³ , calculado para una base "sin aire", kg/m ³	16
Contenido de aire, % del volumen del concreto	1,0
Asentamiento en mm: - Si el asentamiento promedio es 100 mm o menos, mm - Si el asentamiento promedio está entre 100 y 150, mm	25 38
Contenido de agregado grueso porción por masa de cada muestra retenida en el tamiz 4,75 mm, %	6,0
Densidad del mortero sin aire ^A , basado en el promedio comparativo para todas las muestras ensayadas, %	1,6
Resistencia a la compresión promedio a 7 días para cada muestra ^B , con base en el promedio de resistencia para todos los especímenes de ensayo, %	7,5 ^C

^A Para el ensayo de la variabilidad de los ingredientes, debe consultarse la designación 26 Bureau of Reclamation Concrete manual.

^B Se deben fundir y ensayar no menos de tres cilindros por edad para cada una de las muestras.

^C La aprobación tentativa de la mezcladora se puede condicionar de acuerdo con los resultados del ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días.

11.4.1 Tipos de mezcladoras

Las mezcladoras comúnmente usadas son las de caída libre y de acción forzada.

Mezcladora de caída libre

La mezcladora de caída libre o de mezclado por gravedad, consiste en un tambor de forma tronco-cónica, cuyo interior posee un conjunto de paletas adosadas en su costado. El mezclado se produce durante la rotación del tambor, cuando las paletas llevan el material hasta la parte superior y caen por acción de la gravedad.

Se distinguen dos tipos, basculante y no basculante. En la mezcladora basculante, la cámara de

mezclado se inclina para la descarga (Figura 11.12). En la no basculante, el eje horizontal de la mezcladora permanece fijo durante el mezclado, y la descarga se hace mediante la inserción de una canaleta al interior de la olla, o al invertir el sentido de rotación de la mezcladora (Figura 11.13).



Figura 11.12. Mezcladora de caída libre basculante



Figura 11.13. Mezcladora de caída libre no basculante †

Mezcladora de acción forzada

La mezcladora de acción forzada es aquella cuyo funcionamiento es similar a una batidora eléctrica de pasteles. Suelen ser de dos tipos: de bandeja y de artesa.

La mezcladora de bandeja consiste en un recipiente cilíndrico de poca altura, con uno o

► 11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto

dos sistemas de paletas que giran alrededor de un eje vertical no coincidente con el eje del recipiente (Figura 11.14). El recipiente cilíndrico puede ser fijo o giratorio. Cuando es móvil, el recipiente se mueve en un sentido mientras las paletas lo hacen en dirección contraria, obteniéndose como resultado una masa uniforme. Transcurrido el tiempo establecido de mezcla, se efectúa la descarga abriendo una válvula de fondo, dejando que las paletas empujen el concreto hacia la abertura.



Figura 11.14. Mezcladora de acción forzada de bandeja †

Las mezcladoras de artesa constan de un recipiente cilíndrico, con uno o dos ejes horizontales dotados de paletas que ejercen la acción de mezclado (Figura 11.15). En las de doble eje, cada uno gira en sentido inverso al otro para lograr una mezcla más íntima y homogénea. La descarga de la artesa se puede realizar por el fondo o por vuelco de todo el recipiente cilíndrico.

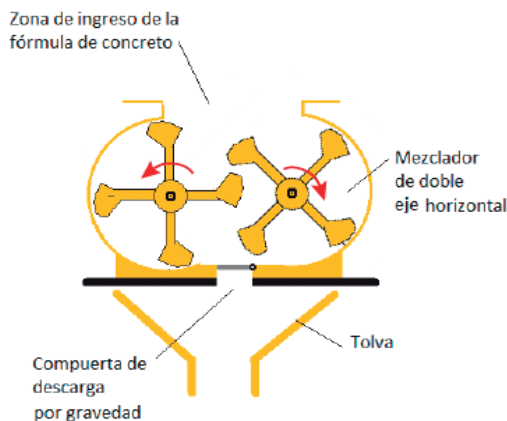


Figura 11.15. Esquema de mezcladora de acción forzada de artesa †

Dependiendo del diseño de la planta (si es únicamente dosificadora o bien dosificadora y mezcladora), las mezcladoras pueden clasificarse en: de camión mezclador o mixer y fijas, entendiéndose como mezcladora fija aquella que efectúa el mezclado parcial o total en la planta.

11.4.2 Capacidad y mantenimiento de las mezcladoras

La capacidad de los distintos tipos de mezcladoras es variable. Se fabrican en tamaños que van desde los 0,04 m³, para uso en laboratorio, llegando hasta los 13 m³ o más. En cualquier caso, se recomienda que el volumen a mezclar no sea inferior al 70% de su capacidad, para que la mezcla resultante sea uniforme y la operación no resulte antieconómica. Tampoco se recomienda que trabaje con sobrecarga, aunque un exceso que no sobrepase el 10%, no tiene efectos importantes en la calidad de la mezcla.

El mantenimiento apropiado es clave en el adecuado funcionamiento de la mezcladora. Cada fabricante sugiere los periodos de limpieza, tiempo de mezclado, y estado de las paletas. La limpieza ayuda a evitar el escape de mortero y materiales secos; aumenta la efectividad del mezclado y permite controlar el estado de las paletas. Las paletas muy gastadas producen un mezclado deficiente y no uniforme. Mezcladoras con velocidad más alta a la sugerida por el fabricante, trae como consecuencia mezclados deficientes.

11.4.3 Orden de ingreso de los materiales a la mezcladora

Para el orden de ingreso de los materiales a la mezcladora existen varios criterios, que dependen básicamente de la capacidad de la mezcladora y del tipo de mezcla. En cualquier caso, el cemento nunca debe ser el primer material en ingresar, pues se adhiere a las paredes y a las paletas de la mezcladora.

El ACI recomienda que el agua entre primero y continúe fluyendo mientras los demás ingredientes se van cargando. Para ello, las tuberías que suministran el agua deben estar colocadas apropiadamente y tener un tamaño suficiente, considerando que el agua entre adecuadamente en la mezcladora y termine su carga en un 25% del tiempo

inicial del mezclado. Lo recomendado es que el cemento se cargue junto con otros materiales, pero luego que haya ingresado aproximadamente el 10% del agregado. Para este efecto, los agregados y el cemento se deben añadir lo más uniforme posible.

Los aditivos se dosifican atendiendo las recomendaciones del fabricante. Los aditivos líquidos se colocan con parte del agua de mezclado; y los cementantes complementarios y otros aditivos en polvo deben mezclarse con los demás ingredientes secos. Cuando se emplea más de un aditivo, cada uno debe ser dosificado separadamente y no pre mezclarse antes de introducirlo a la mezcladora.

Para compensar la cantidad de material, que inevitablemente se pega a las paletas y a las paredes de la mezcladora, se recomienda introducir algo de mortero que tenga las mismas características de la mezcla, antes de la elaboración de la primera bachada. Este procedimiento es muy necesario, especialmente en el laboratorio.

11.4.4 Tiempo de mezclado

Es un factor importante en la fabricación del concreto, puesto que influye en propiedades tales como la uniformidad, la manejabilidad, la resistencia y la durabilidad, entre otras.

Un tiempo de mezclado demasiado corto trae como consecuencia concretos no uniformes, de baja resistencia y reducida durabilidad. Por el contrario, tiempos de mezclado excesivos facilitan la evaporación del agua de mezclado, con la eventual pérdida de manejabilidad. Además pueden generar desintegración parcial del agregado, debido al proceso de abrasión al que es sometido, generando un exceso de finos en la mezcla y una disminución en la trabajabilidad.

La curva de la Figura 11.16 muestra cómo la resistencia promedio del concreto se incrementa con un aumento en el tiempo de mezclado. Pero se puede apreciar que la velocidad de este aumento decrece rápidamente después de aproximadamente un minuto, y no es significativo después de dos. Dentro del primer minuto la influencia del tiempo de mezclado sobre la resistencia es muy importante. Por ejemplo, algunos ensayos indican que para una resistencia dada, el aumentar el tiempo de mezclado de 30 a 60 segundos permite una disminución en el contenido de cemento de hasta 30 kg por metro cúbico. El ACI recomienda los tiempos mínimos de mezclado relacionados en la Tabla 11.3.

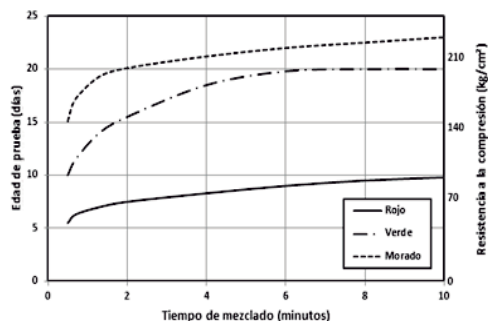


Figura 11.16. Efecto del tiempo de mezclado en la resistencia del concreto

Adaptado de referencia 11.20

Tabla 11.3. Tiempos mínimos de mezclado recomendados (11.1)

Capacidad de la mezcladora, m³	Tiempo de mezclado, minutos
0,8	1
1,5	1 ¼
2,3	1 ½
3,1	1 ¾
3,8	2
4,6	2 ¼
7,6	3 ¼

Normalmente el fabricante de la mezcladora recomienda la velocidad de rotación óptima, de modo que el tiempo de mezclado y el número de revoluciones son interdependientes. Si por alguna circunstancia se tiene como dato único la velocidad a la que gira la mezcladora, se puede calcular de forma aproximada el tiempo mínimo de mezclado, como el tiempo necesario para que la mezcladora complete veinte revoluciones.

11.4.5 Otros sistemas de mezclado

El proceso de mezclado también se puede realizar por uno de los siguientes métodos:

- Mezclado en camión.
- Mezclado parcial en planta, agitado durante el transporte y terminado en el sitio.
- Dosificado en planta, transportado en seco y mezclado en sitio.

Cualquiera que sea el método empleado, se utiliza un camión mezclador de tambor giratorio, como el enseñado en la Figura 11.17. Los materiales previamente dosificados en planta, se transfieren a un camión donde se realiza la operación de mezclado.

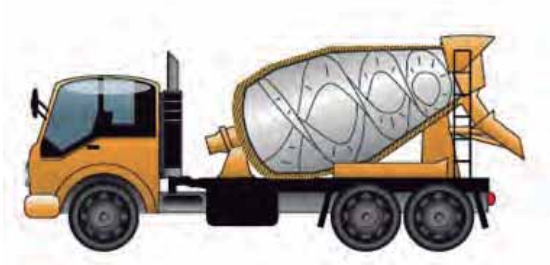


Figura 11.17. Camión mezclador o mixer*

El camión mezclador tiene 2 tipos de velocidades, de agitación y de mezclado. La diferencia se encuentra solamente en las revoluciones por minuto del tambor, siendo la de agitación entre 2 y 6 rpm, y la de mezclado entre 6 y 16 rpm.

Cuando el tambor se está cargando gira a la velocidad designada por el fabricante del camión. Después de cargar completamente todos los materiales, el tambor gira a velocidad de mezclado, empleando entre 70 y 100 revoluciones para completar el mezclado bajo condiciones normales. Si transcurre tiempo adicional después del mezclado y antes del descargue, la velocidad del tambor se reduce a la velocidad de agitación o se detiene. Antes de la descarga, el tambor gira de nuevo a la velocidad del mezclado entre 10 y 15 revoluciones para re-mezclar los posibles materiales que están cerca de la descarga.

El concreto mezclado parcialmente en planta y terminado en tránsito, se logra al efectuar un pequeño mezclado, generalmente de 15 a 30 segundos, en una mezcladora fija en la planta, y completando el proceso en el tambor del camión mezclador. El procedimiento para éste tipo de concreto es el mismo que el de concreto mezclado en camión, excepto que el tiempo de mezclado dentro del tambor del camión es reducido a lo determinado por las pruebas de uniformidad.

Mediante el método de dosificación y transporte en seco, los materiales se transportan al sitio de la obra dentro del tambor del camión. El agua de mezclado se lleva por separado en un tanque montado en el mismo camión. El agua se agrega a presión a la entrada, mientras el tambor gira a velocidad de mezclado. Este método es efectivo para viajes largos y cuando se presentan demoras en la colocación, permitiendo un mayor tiempo de espera en el transporte y la descarga. Se debe tener cuidado con

la humedad libre de los agregados, pues provoca algo de hidratación en el cemento. Por tal razón, no es conveniente que los materiales permanezcan durante mucho tiempo en este estado, más aun si se usa un cemento de alta resistencia inicial.

11.5 Transporte, manejo y colocación del concreto

Existe una gran variedad de técnicas para realizar las operaciones de transporte, manejo y colocación del concreto, siendo los más empleados el camión mezclador, las volquetas, las vagonetas, las torre grúa o pluma, el bombeo; y en pequeñas distancias, las carretillas, los ductos, las mangueras, las bandas transportadoras y los canalones, canales o canaletas. No obstante, cualquiera que se sea el método o el equipo usado, será adecuado en la medida que conserve la calidad de la mezcla, en especial, a lo que se refiere la relación agua/cemento, consistencia, contenido de aire y homogeneidad. Adicionalmente, la buena organización de la obra también cuenta para el éxito de esta actividad, previendo suficiente capacidad de equipos para el transporte y la colocación, de modo que el concreto se pueda mantener plástico y evitar la formación de juntas frías mientras se coloca.

La NSR - 10 establece que el transporte del concreto debe evitar su segregación o la pérdida de material, así como proporcionar el abastecimiento en el sitio de colocación sin segregación y sin interrupciones, que causen pérdida de plasticidad entre capas sucesivas de colocación.

La colocación del método de transporte depende, básicamente, de la capacidad del equipo y tiempo de entrega; la ubicación y acceso a la obra, los componentes de la mezcla, y las condiciones climáticas.

La NSR - 10 establece que la entrega del concreto se debe hacer lo más cerca posible de su ubicación final, para evitar la segregación debida a su manipulación. La colocación se debe efectuar a una velocidad tal, que el concreto conserve su estado plástico en todo momento y fluya fácilmente dentro de los espacios del refuerzo. No se debe colocar dentro de la estructura de concreto que

haya endurecido parcialmente o que se haya contaminado con materiales extraños. Tampoco se debe utilizar concreto al que, después de preparado, se le adicione agua, ni que haya sido mezclado luego de su fraguado inicial, a menos que sea aprobado por el diseñador del concreto. No se debe exceder la relación a/mc. Una vez iniciada la colocación, se debe hacer de forma continua hasta terminar la sección, definida por sus límites o juntas predeterminadas.

Los siguientes aspectos resumen las prácticas específicas recomendadas, respecto de los métodos y equipos para el transporte, el manejo y la colocación, recordando que en el Capítulo 9 - Concretos Especiales, se hizo referencia a los métodos, equipos, herramientas, maquinaria y procedimientos específicos, que cada concreto considerado como especial requiere.

11.5.1 Camión mezclador (Mixer)

Este método es uno de los más versátiles y empleados, por las siguientes razones:

- El concreto se puede hacer en planta, transportarlo y colocarlo en obra directamente desde el mixer.
- Permite conservar o modificar las características de la mezcla: ajustar la cantidad de aditivos, fibras y agregar el agua.
- Se pueden recorrer grandes distancias o emplear tiempos prolongados de acarreo.
- Se puede controlar la descarga, de acuerdo con la necesidad de cada aplicación.
- La descarga se puede hacer en un arco horizontal de 180°, mejorando su distribución.
- Se pueden hacer descargas de mezclas con cualquier grado de trabajabilidad, aunque para concretos con asentamiento inferior a 5 cm, se hace muy lenta.
- Permite el uso de extensiones de canalones hasta de 4,5 m, brindando mayor versatilidad (Figura 11.18).
- Permite acoplar la mixer a otros equipos de transporte, como es el caso de las bombas.



Figura 11.18. Descarga de concreto con mixer ✧

11.5.2 Volquetas

Las volquetas para transportar concreto constan de una caja abierta montada sobre un camión; el descargue se realiza por la parte posterior, volteando la caja (Figura 11.19).



Figura 11.19. Volqueta para transporte de concreto

Cortesía Constructora Conconcreto

Es un medio fácil y rápido. Una vez cargada la mezcla en la volqueta, no se pueden cambiar sus características. Se recomienda para distancias hasta de 10 km, siempre y cuando se asegure que la descarga se pueda ejecutar dentro de un espacio suficiente. Algunas están provistas de un vibrador montado en la caja, facilitando la operación. La descarga es rápida, pero difícil de controlar y únicamente la permite en una dirección, haciendo difícil la distribución de la mezcla. También se recomienda para el transporte de concretos de baja manejabilidad (máximo 5 cm de asentamiento), con el fin de evitar segregación y compactación. La capacidad de transporte está entre 3 y 7 m³.

El transporte de concreto fresco a través de volquetas requiere de algunas precauciones:

11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto

- Antes del cargue, se deben limpiar todas las superficies de contacto.
- Usar cubiertas protectoras (Figura 11.19), evitando que el material se contamine o se vea afectado por las condiciones climáticas (lluvia, viento o excesivo sol).
- Es recomendable emplear vías planas y pavimentadas.
- Efectuar la entrega antes de 45 minutos, teniendo en cuenta siempre las condiciones del clima que pueden obligar a tiempos menores.
- Algunos recorridos exigen entregas menores a 30 minutos, aunque el uso de aditivos retardantes de fraguado puede aumentar el tiempo.

11.5.3 Vagonetas

Las vagonetas son recipientes montados en camiones, carros de ferrocarril o cables (Figura 11.20), que se constituyen en un método de transporte masivo, desde la planta de mezclado, hasta un punto cercano del lugar de colocación. Este método requiere del trabajo conjunto con una grúa que levanta el recipiente hasta el punto final de colocación.

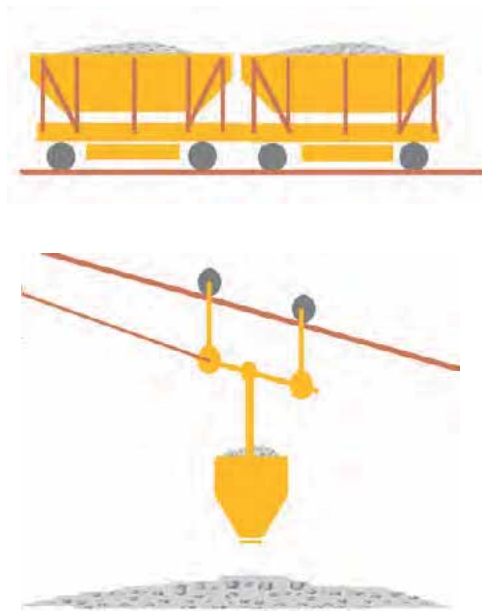


Figura 11.20. Vagonetas y cable para el transporte de concreto †

En ocasiones se utilizan carros que operan sobre rieles, para transportar el concreto desde la planta de mezclado hasta los recipientes que operan en

cable-vías. La descarga del concreto de los carros al recipiente, se efectúa por el fondo o por algún sistema de vuelco. El tiempo de entrega por este medio puede ser entre 30 y 45 minutos, aunque no es muy común su uso.

11.5.4 Torres grúas o plumas

En algunos trabajos, la combinación de grúa y cubetas es un medio efectivo para transportar y manejar el concreto (Figura 11.21).



Figura 11.21. Sistema de balde y torre grúa para manejo, transporte y colocación de concreto †

Este sistema presenta varias ventajas, destacándose las siguientes:

- Permite manejar grandes y pequeñas cantidades de concreto sin necesidad de procesos intermedios.
- El sistema de descarga vertical por el fondo garantiza una mínima segregación.
- Constituye un medio económico y versátil para colocar concreto y transportar materiales en la construcción de estructuras altas u horizontales con poco espacio.
- Requieren de un espacio pequeño en su montaje, así como de un reducido personal en la operación.

Con este sistema, cada grúa tiene la capacidad de atender simultáneamente hasta tres cubetas. La capacidad de cada cubeta varía entre 0,7 y 2,5 m³ de concreto, con agregado de TM menor a 75 mm (3").

11.5.5 Bombeo

El sistema de transporte y colocación del concreto por bombeo, es uno de los más utilizados por las innumerables ventajas que presenta. Tal como se anunció en el Capítulo 9, en este se tratarán las características generales del método y las recomendaciones para que la operación de bombeo sea exitosa.

Características generales del sistema

El sistema de bombeo se compone básicamente de una tolva que recibe el concreto de la mezcladora, la bomba propiamente dicha, y una tubería a través de la cual fluye el concreto (Figura 11.22).

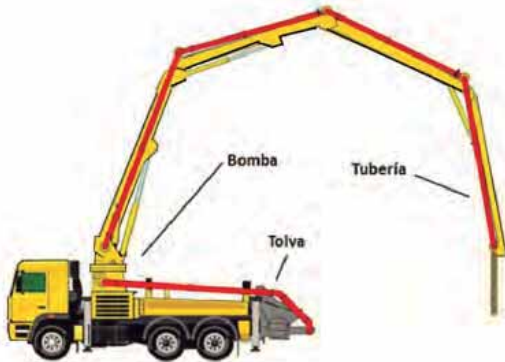


Figura 11.22. Esquema general de una bomba para concreto*

La capacidad de bombeo depende fundamentalmente del tipo y características de la bomba, así como de la mezcla que se quiere transportar. En general, existen dos tipos de bombas para concreto: de pistón horizontal y peristáltica, que pueden transportar entre 8 y 70 m³/h, dependiendo de la capacidad y el tipo de mezcla.

Las bombas de pistón horizontal están compuestas por unas válvulas que se abren y se cierran a intervalos definidos, de modo que el concreto se mueve en una serie de impulsos, permaneciendo siempre el tubo lleno (Figura 11.23). Este tipo de bomba es altamente efectiva, pudiendo mover el concreto horizontalmente hasta cerca de 1.000 m, o 120 m verticalmente; también pueden combinar distancias y elevación. En cuanto al rendimiento, se pueden lograr hasta 130 m³/h.

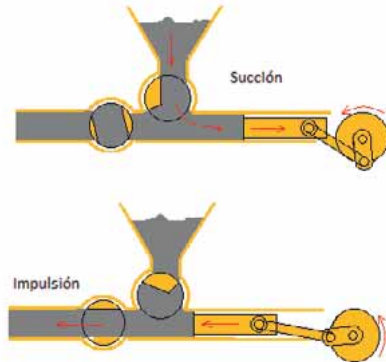


Figura 11.23. Esquema de una bomba de pistón*

Las bombas peristálticas (Figura 11.24) son portátiles (también llamadas bombas de tubo compresible), se usan con tubos de diámetro pequeño (hasta 75 mm o 100 mm) y pueden mover concreto hasta 90 m en sentido horizontal, y hasta 30 m verticalmente.

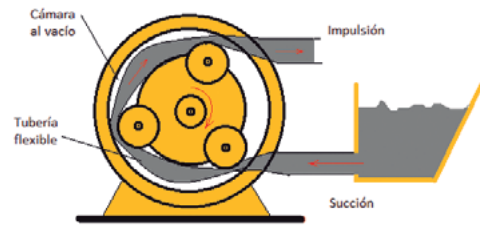


Figura 11.24. Esquema de una bomba de pistón*

Sin importar el tipo de bomba, se debe minimizar el uso de codos. Si se emplean, no deben tener ángulos agudos. Cada cambio de dirección equivale a una longitud de hasta 1 m de tubo. Con este tipo de bombas se puede tener un rendimiento de hasta 20 m³/h, con tubería de 75 mm de diámetro.

Las bombas pueden ser estar montadas en el camión mezclador o en un remolque, y entregar el concreto a través de una pluma replegable (Figura 11.25).



Figura 11.25. Bombas montadas en camión y en remolque*

11.5.5.2 Recomendaciones para la operación de bombeo

Algunos aspectos importantes para tener en cuenta durante el bombeo son los siguientes:

- Antes del inicio de la operación, lubricar tanto la bomba como la tubería, bombeando primero agua y después mortero (aproximadamente 0,25 m³ de mortero por metro de tubo de 75 mm de diámetro), buscando disminuir la fricción entre la tubería y la mezcla, además de evitar que el mortero quede pegado en las paredes de la tubería.
- En lo posible no usar tuberías de aluminio, pues reaccionan con los componentes del cemento, generando hidrógeno, que incorpora aire en la mezcla con la consecuente pérdida de resistencia.
- Programar la operación para que se realice de manera continua, evitando que formen costras en la tubería y eventuales obstrucciones y taponamientos.
- Efectuar ensayos de control de calidad tanto a la entrada como a la salida de la bomba, verificando que no se produzcan cambios significativos de consistencia o de contenido de aire. Es posible que en el punto de entrega del concreto bombeado se produzca una disminución de asentamiento entre 10 y 25 mm, puesto que durante la operación ocurre una compactación parcial como resultado de la presión ejercida sobre la mezcla.
- Terminada la operación, realizar la limpieza del equipo acorde con el procedimiento recomendado por el fabricante.

11.5.6 Bandas transportadoras

La banda transportadora es una unidad de aproximadamente 15 m de longitud y 0,5 m de ancho, utilizada en algunas ocasiones para transportar concreto en pequeñas alturas o para el manejo del concreto en tramos horizontales.

El uso de este sistema exige que la banda esté apoyada adecuadamente para lograr un transporte suave y sin vibración, que evite la segregación de la mezcla. Así mismo, requiere que el ángulo de inclinación en la banda sea el mínimo posible, para impedir que las partículas de agregado más grandes

se rueden devolviéndose. Sin embargo, la inclinación máxima que se puede emplear en una banda es variable, siendo función tanto de las características de la mezcla como del diseño de la banda. Una banda corrugada en la superficie que lleva la carga, puede transportar concreto a través de inclinaciones empinadas con mayor éxito que las bandas lisas.

Para el caso de bandas transportadoras normales, las mezclas de concreto de consistencia media pueden elevarse un ángulo entre 20° y 30° sin dificultad, siendo las alturas máximas hasta 10 m. Se recomiendan mezclas de asentamiento máximo entre 50 y 100 mm. Mezclas muy húmedas se segregan, pudiéndose mitigar si se usa aire incorporado, pues este incrementa la cohesividad.

Cuando se prevean condiciones climatológicas severas, tales como viento fuerte, lluvia o temperaturas altas, se deben emplear protecciones o cubiertas para las bandas, de manera que no ocurran cambios significativos en las propiedades de la mezcla.

Es posible colocarlas en serie (varias unidades una tras otra) y obtener así mayor distancia de transporte. Tiene una capacidad de colocación entre 110 y 230 m³/h, funcionando regularmente a una velocidad de 150 m/min. A pesar de que la velocidad es relativamente alta, normalmente no es necesario disponer de protección para evitar el secado durante el transporte, aunque algunas especificaciones lo exigen, como el ACI 301S (Especificaciones para concreto estructural). Con éste sistema se puede transportar concreto con distancias hasta de 120 m, sin que se alteren las características de la mezcla.

Las bandas transportadoras requieren de mantenimiento luego de su uso. Todo el sistema comprendido por tolvas, aspas y bandas, se deben limpiar y evitar que se adhiera pasta de cemento. Antes de ser usadas, también es recomendable realizar una pequeña prueba antes de la llegada del concreto, para verificar su correcto funcionamiento. La Figura 11.26 ilustra la colocación de un sistema de bandas en operación.



11.5.7 Carretillas y carros motorizados (buggy)

El transporte de concreto por medio de carretillas y carros motorizados se recomienda en distancias cortas, no mayores a 60 m. No son apropiados cuando se maneja un volumen grande de concreto, pues el descargue en carretilla y su posterior colocación requiere mayor exigencia en mano de obra que otros métodos, convirtiéndose en una desventaja.

Es importante que las vías de tránsito por donde circulan sean lisas, rígidas, con pendientes menores al 15% y libres de elementos que puedan causar golpes bruscos que segreguen la mezcla, en especial aquellas con asentamientos altos (> 100 mm). La Figura 11.27 ilustra el transporte y colocación por medio de buggies.

Las ruedas de la carretilla deben ser de caucho para que amortigüe el movimiento durante el transporte (Figura 11.28). Así mismo, las vías para la colocación con carretillas deben tener un soporte sobre el acero de refuerzo de la estructura, para evitar su desplazamiento. Permiten el transporte de cantidades entre 50 y 70 litros, con rendimientos cercanos a 0,5 m³/h.



Figura 11.26. Detalle de bandas transportadora
arriba: construcción Porce II
abajo: en una planta de mezcla



Figura 11.27. Transporte de concreto en buggy ✧

11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto



Figura 11.28. Carretilla tipo para transporte de concreto

11.5.8 Canales, canaletas o canalones

El método de canales, canaletas o canalones se emplea con frecuencia para trasladar el concreto de elevaciones superiores a inferiores, aprovechando la gravedad. Constituye uno de los procedimientos más sencillos y económicos, en especial cuando se trata de transportar grandes cantidades y distancias cortas, menores a 6 metros (Figura 11.29).

Las canales tienen forma semicilíndrica y están construidos o forrados en metal para permitir que el concreto fluya de forma continua, sin segregarse. Se les debe proveer de una inclinación constante y suficiente, normalmente de 1 a 3, o 1 a 2 (vertical: horizontal).



Figura 11.29. canaletas o canalones para colocar concreto

La descarga del material debe ser siempre vertical, pero a poca altura (menor de 1,5 m) para impedir su segregación. Cuando son demasiado largas y descubiertas, se debe procurar cubrir las evitando la pérdida de material y disminución de la manejabilidad. La Figura 11.30, muestra algunas recomendaciones adicionales dadas por el ACI 304, en cuanto a métodos correctos e incorrectos del manejo del concreto, mediante diferentes métodos.

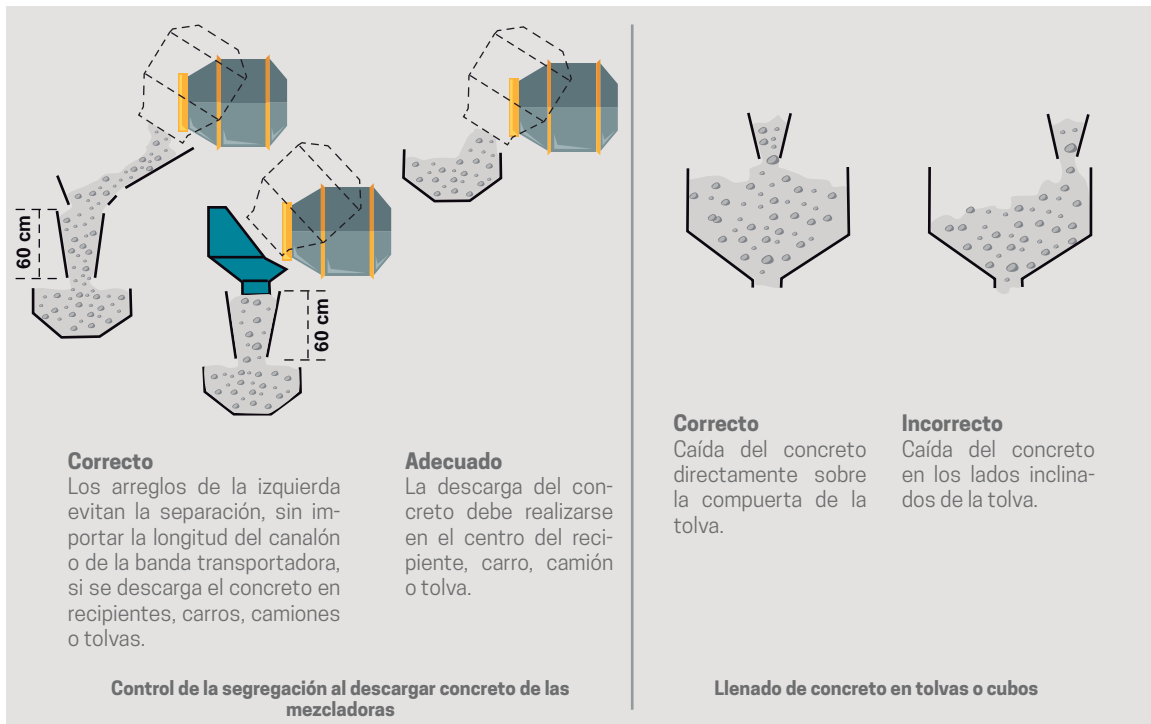
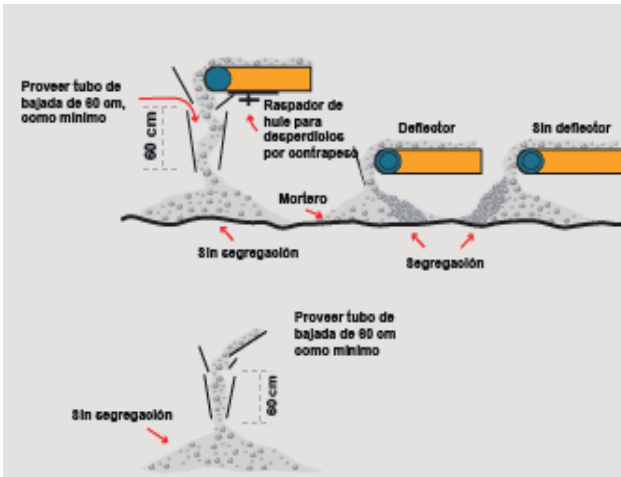


Figura 11.30. Métodos correctos e incorrectos en el manejo del concreto (Adaptado del ACI, 11.1)*



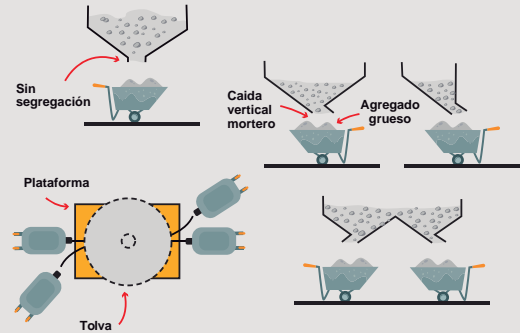
Correcto

Se evita la segregación del concreto sin importar si se descarga en recipientes, carros, camiones o tolvas.

Incorrecto

Control incompleto al final de una banda. Generalmente, un deflector o tolva baja únicamente cambian el sentido de la segregación.

Control de la segregación del concreto en el extremo de la banda transportadora



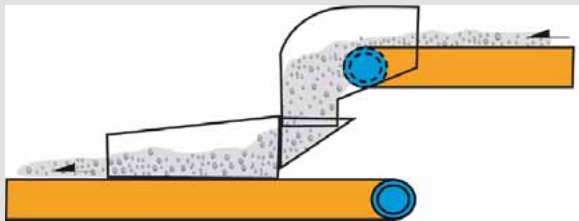
Correcto

Descargar por una abertura central y verter, verticalmente, al centro del coche (carreta). Se puede lograr una carga más rápida alternado el acceso por dos lados opuestos, pero se requiere una tolva dividida, con dos compuertas de descarga.

Incorrecto

Compuertas inclinadas, que en realidad son canales sin control de salida. Causan una segregación inconveniente al llenar los carros.

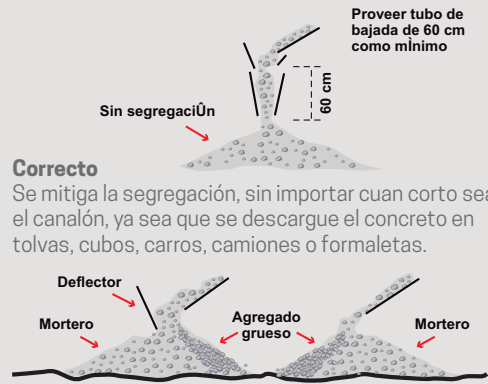
Descarga de tolvas para cargar carros de concreto



Control en el punto de transferencia de dos bandas transportadoras

Correcto

Se evita la segregación del concreto usando un deflector que recibe el concreto de la banda más alta.



Correcto

Se mitiga la segregación, sin importar cuán corto sea el canalón, ya sea que se descargue el concreto en tolvas, cubos, carros, camiones o formaleas.

Incorrecto

Control inadecuado o falta de control al final de cualquier canalón de concreto.

Control en el punto de transferencia de dos bandas transportadoras

Figura 11.30. Continuación (11.1)

11.5.9 Tubo embudo Tremie

El sistema de colocación por tubo Tremie se estudió en el Capítulo 9, Concretos Especiales.

11.5.10 Actividades previas a la colocación (vaciado)

Previo al vaciado del concreto, es necesario efectuar una serie de actividades logísticas y de verificación en obra, para asegurar de que el proceso dé como resultado final el cumplimiento de los requisitos exigidos. Tales actividades incluyen la planeación del vaciado, la preparación de las formaletas, la adecuación del sitio del vaciado, los controles previos pertinentes y la temperatura de la mezcla.

Planeación del vaciado

La planeación del vaciado se debe realizar conjuntamente entre el constructor y la empresa que suministra el concreto. Es recomendable una reunión previa entre las partes, para acordar los lineamientos, roles y detalles. Entre otros, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos.

Información general del proyecto

Se sugiere elaborar un formato que incluya la siguiente información:

- Nombre del proyecto.
- Localización.
- Fecha de inicio del suministro.
- Fecha de finalización del suministro.
- Participantes (que incluya los datos del contacto):
 - o Propietario.
 - o Arquitecto.
 - o Ingeniero estructural.
 - o Director o contratista del proyecto.
 - o Productor de concreto.
 - o Suministrador de aditivos.
 - o Contratista de bombeo.
 - o Contratista de acabado del concreto.
 - o Laboratorio de ensayos.
 - o Interventoría.
 - o Otros.
- Antecedentes relevantes del proyecto.
- Características especiales del proyecto.
- Tipos de concreto que se suministrarán.
- Precios y condiciones comerciales acordadas de los diferentes tipos de concreto.

Programación del pedido de la mezcla

Se sugiere tener en cuenta lo siguiente:

- Información general.
- Nombre del solicitante (de la empresa y de la

- persona que la realiza).
- Nombre y dirección del proyecto.
- Precio acordado.
- Tipo de concreto solicitado.
- Tipo específico de la mezcla.
- Asentamiento.
- TMN.
- Contenido de aire
- Resistencia especificada a la compresión, o módulo de rotura (para pisos y pavimentos).
- Características específicas (en caso de haberlas).
- Programación de suministro.
- Fecha y hora requerida, acorde con una programación semanal establecida, y confirmada con 24 horas de anterioridad.
- Cantidad, en m³, de cada tipo de mezcla.
- Periodicidad de las entregas, de acuerdo con el ritmo de la obra. Un camión mezclador se debe descargar en media hora, lo que da un rendimiento entre 10 y 16 m³/h.
- Servicios adicionales como bomba o banda transportadora. Estos casos pueden requerir de la visita previa del proveedor para ver las condiciones y dar recomendaciones pertinentes.

Permisos requeridos y adecuación para la descarga

Algunos sitios externos a la obra requieren la solicitud de permisos para el paso, acceso, maniobras o estacionamiento del equipo de transporte y descarga del concreto, los cuales deben ser hechos oportunamente para evitar contratiempos en la entrega. Así mismo, algunos sitios deben adecuarse para que los equipos puedan maniobrar de manera expedita y segura durante la descarga en la obra.

Verificación del mezcladero

La organización de muchas de las obras del sistema de transporte y manejo interno de la mezcla, requiere que el concreto sea entregado en un mezcladero (Figura 11.31). Para el efecto, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Que cuente con la capacidad suficiente para el recibo de las cantidades solicitadas.
- Que sea estanco para evitar pérdida de

- pasta o mortero.
- Que resista la presión del concreto fresco y no se deforme ni se rompa durante las actividades de descarga y manejo de la mezcla.
- Humedecerlo previo al descargue sin dejar charcos.
- Que se encuentre limpio y sin elementos que contaminen la mezcla.
- Que cuente con el personal suficiente e idóneo para el manejo expedito del concreto.

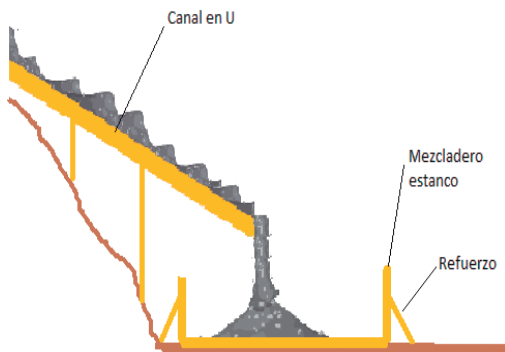


Figura 11.31. Mezcladero de recibo de concreto por canaleta ✧

Preparación para el vaciado sobre formaletas

Por lo general, la colocación del concreto se hace en formaletas (Figura 11.32), que deben cumplir los siguientes requisitos mínimos:

- Se deben diseñar y construir de modo que tengan suficiente resistencia y rigidez para soportar las cargas que se apliquen hasta que la estructura sea capaz de soportarse por sí misma y mantener las tolerancias especificadas. Las cargas que deben resistir, son:
 - o El peso del concreto
 - o El peso propio de la formaleta
 - o El peso del personal de obra
 - o El peso del equipo, de los materiales y el de impacto.
 - o Los empujes del concreto fresco durante la colocación y el vibrado.
- No sufrir deformaciones o abertura de las paredes por falla de los tensores o de los soportes.
- Deben ser funcionales, de fácil colocación y desmonte.
- Que tengan las medidas exactas que requiere el elemento que se va construir.
- El material empleado debe ser adecuado para

obtener la superficie deseada en el concreto endurecido. Cuando se use madera, ésta debe ser humedecida previo al vaciado, para evitar que absorba parte del agua de mezclado.

- Deben ser herméticas para evitar la pérdida de mortero o de pasta. Cuando son de madera, las aberturas:
 - o Menores de 3 mm se cierran solas.
 - o Entre 4 y 10 mm, pueden cerrarse mediante un tapón de papel húmedo o estopa.
 - o Y las mayores a 10 mm, deben cerrarse con listones o rehacer la sección.
- Antes de la colocación del concreto:
 - o Deben estar limpias y libres de cualquier sustancia o restos de material.
 - o Se debe colocar un desmoldante sobre la superficie de contacto con el concreto, para impedir que se adhiera a la formaleta y sin que manche la superficie del concreto. Debe evitarse que el acero de refuerzo se contamine con desmoldante.



Figura 11.32. Detalles de formaletas para concreto deslizado, Proyecto hidroeléctrico Ituango
Cortesía Constructora Conconcreto

Preparación para el vaciado sobre el terreno natural

Para evitar que el concreto se contamine con el suelo natural, cuando el vaciado se realiza sobre este, hay que hacer una preparación previa, consistente en:

► 11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto

- Eliminar las partículas sueltas en el suelo, restos de vegetales, partículas de origen orgánico o arcilloso, y en general todo aquello que pueda contaminar la mezcla.
- Humedecer (sin hacer charcos) los suelos secos y poco cohesivos, para evitar que absorban agua de la mezcla; también se pueden revestir con un concreto pobre.
- Para terrenos rocosos, formados por estratos firmes:
 - Eliminar todas las partículas sueltas.
 - Si existen grietas pequeñas, rellenarlas con mortero.
 - Si las grietas son grandes, rellenarlas con concreto pobre.
 - Proteger las paredes del terreno natural con láminas de polietileno o tableros móviles, que se van sacando a medida que se coloca el concreto.
- Colocar plásticos sobre terrenos húmedos como barreras de vapor, para evitar alabeos por diferencial de humedad entre la parte inferior y la superior de la losa.
- Colocar geotextiles para aislar el terreno del concreto, en caso que sea especificado.
- Aplicar el puente de adherencia. Puede ser una imprimación con el mismo material que se va a reparar, o un adhesivo epóxico.
- Si es con el mismo material, el concreto debe estar húmedo (saturado) antes de la aplicación del adherente, pero sin charcos o empozamientos, y la aplicación del mortero de reparación se debe hacer antes de que la capa de imprimación seque.
- Si es un adherente epóxico, la superficie puede estar húmeda pero sin empozamientos. Se debe elegir el tipo de adherente dependiendo del tiempo disponible para la aplicación del mortero de reparación, pues algunos permiten hasta 15 minutos, mientras que otros admiten hasta 8 horas.
- Colocar la formaleta, en caso de requerirse, debidamente impregnada con desmoldante.
- Vaciar el concreto.

Preparación para el vaciado sobre concreto endurecido

En general, se recomienda el siguiente procedimiento:

- Retirar el material de recubrimiento y limpiar la superficie, con el fin de eliminar todo el material suelto y obtener una superficie estructuralmente sana, libre de pinturas, curadores, grasa, aceite y polvo.
- Obtener el perfil de adherencia adecuado como mínimo de 3 mm, o el agregado grueso ligeramente expuesto (Figura 11.33), logrado mecánicamente mediante: chorro de agua con una presión aproximada de 7 kg/cm², dirigido en forma inclinada y desde unos 50 cm de altura sobre la superficie; chorro de arena (sandblasting), cepillado con cerdas de alambre, o picando la superficie con puntero y maceta.



Figura 11.33. Preparación de la superficie: obtención del perfil de adherencia

Cortesía Constructora Conconcreto

11.5.11 Verificaciones previas al vaciado

Antes de la colocación del concreto, es necesario verificar el cumplimiento de las especificaciones en lo que se refiere a posición del acero: diámetro, número de varillas, distancia entre ellas, longitudes de anclaje, traslapeo y estribos. También se debe comprobar que el acero tendrá el recubrimiento especificado o la distancia mínima que debe existir entre el acero y la formaleta. Así mismo, se debe comprobar que la armadura esté libre de polvo, aceite u óxido, que asegure una buena adherencia.

La Tabla 11.4 muestra los requisitos dados por la NSR - 10 en concretos construidos in situ, en cuanto al recubrimiento mínimo que debe darse al acero de refuerzo con el fin de protegerlo. La norma establece que en ambientes corrosivos, o en otras condiciones severas de exposición y a juicio del diseñador, el recubrimiento de concreto se debe incrementar. La Figura 11.34, muestra un detalle en el recubrimiento de concreto en una estructura.

Tabla 11.4. Recubrimientos exigidos por la NSR - 10 para concreto construido en sitio (no pre-esforzado) (11.4)

Tipo de exposición del concreto	Tipo de barra	Recubrimiento mínimo de concreto, mm
Concreto colocado contra el suelo y expuesto permanentemente a él	Todas las barras	75
Concreto expuesto a suelo o a la intemperie	Barras N° 6 o 20M (20 mm) o ¾" a N° 18 o 55M (55 mm) o 2-1/4"	50
	Barras N° 5 o 16M (16 mm), alambre MW200 o MD200 (16 mm) y menores	40
Losas, muros y viguetas en concreto no expuesto a la intemperie ni en contacto con el suelo	Barras N° 14 o 45M (45 mm) o 1-3/4" y N° 18 o 55M (55 mm) o 2-1/4"	40
	Barras N° 11 o 36M (36 mm) o 1-3/8" y menores	20
Vigas, columnas, en concreto no expuesto a la intemperie ni en contacto con el suelo	Armadura principal, estribos, espirales	40
Cáscaras y placas delgadas, en concreto no expuesto a la intemperie ni en contacto con el suelo	Barras N° 6 o 20M (20 mm) o ¾" y mayores	20
	Barras N° 5 o 16M (16 mm) ó 5/8" alambres MW200 (16 mm de diámetro) y menores	13

El refuerzo se debe colocar y asegurar con la precisión dada en los planos, pues si queda ligeramente fuera de la posición indicada, la resistencia del elemento puede verse afectada. Por ejemplo, levantar las barras de la parte superior o bajar las de la parte inferior en 13 mm (1/2") más de lo especificado, en una losa de 150 mm de espesor, la reducción de la resistencia sería de aproximadamente el 20%. La Tabla 11.5 enseña las tolerancias dadas por La Guía del Contratista para la Construcción en Concreto de Calidad del ACI, en lo que se refiere a la distancia libre a los lados de las formaletas y las superficies de concreto resultantes y la distancia libre a la parte inferior del concreto resultante en la dirección de tolerancia. La Figura 11.34, muestra un detalle de separador y fijador del acero en una estructura.

Tabla 11.5. Tolerancias para la colocación de barras de refuerzo (11.3)

Tamaño del elemento (TE)	Tolerancia, mm
TE ≤ 100 mm	+6 / -9
100 mm < TE ≤ 300 mm	9
300 mm < TE ≤ 600 mm	12
TE > 600 mm	25

Cuando se requiere dejar elementos embebidos como insertos, anclajes y ductos, se debe verificar su estado y correcto afianzamiento, con el fin de evitar desplazamientos durante las operaciones de vaciado y de compactación del concreto. Hay que evitar el contacto de otros tipos de metales con las varillas de la armadura para prevenir la corrosión galvánica.

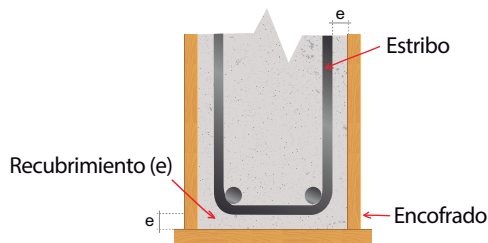


Figura 11.34. Detalles de separadores de acero y recubrimiento de concreto

Como se vio, resulta útil planear el vaciado para no incurrir en improvisaciones. Se debe contar con suficiente personal idóneo y disponer de los equipos necesarios debidamente mantenidos, incluso de equipo adicional en caso tal que alguno se averíe o presente alguna otra emergencia. También se debe

contar con los medios efectivos que protejan el concreto en caso de lluvia, o cuando se prevean temperaturas muy altas o muy bajas.

11.5.12 Temperatura de la mezcla

Un aspecto importante para el vaciado es la verificación de la temperatura, pues el concreto entregado en clima frío debe tener una temperatura mínima de aplicación, pero también una máxima para cualquier clima.

La NTC 3318, establece que el cliente debe informar al productor el tipo de construcción donde se va a utilizar el concreto, y establece las temperaturas mínimas de la mezcla indicadas en la Tabla 11.6.

Tabla 11.6. Temperatura mínima de aplicación del concreto (11.15)

Menor dimensión de los elementos por fundir, mm	Temperatura mínima, °C
< 300	13
300 - 900	10
900 - 1800	7
> 1800	5

De otra parte, la NTC 3318, establece que la temperatura máxima del concreto, producido con agregados calientes, agua caliente, o ambos, no debe exceder de 32 °C en ningún momento, es decir, durante su producción o transporte. También aclara que, cuando se utiliza agua caliente y esta es adicionada directamente al cemento, puede ocurrir endurecimiento rápido. Además, en clima cálido el productor debe entregar el concreto con las temperaturas más bajas posibles, dependiendo de la aprobación del cliente.

Son varias las dificultades que presenta la mezcla cuando su colocación se hace en climas cálidos, y esta presenta temperaturas cercanas o mayores a 32 °C. En primer lugar, se hace necesario aumentar el contenido de agua requerido para el mismo asentamiento, de modo que se reduce la resistencia. En segundo lugar, se acorta el tiempo de fraguado, de manera que se cuenta con menor tiempo para el manejo, transporte y la colocación. En tercer lugar, a mayor contenido de agua, mayor riesgo de contracción. En cuarto lugar, se aumenta el calor de hidra-

tación, y, en quinto lugar, si la mezcla lleva incorporador de aire, se hace necesario aumentar la dosificación del aditivo para lograr la cantidad especificada de aire.

Lo anterior significa que la colocación en climas cálidos implica mayores costos, si hay que cumplir con una temperatura específica del concreto. Algunas medidas que se toman para bajar la temperatura, son:

- Enfriar el agua y los agregados en el lugar de almacenamiento.
- Un cambio de 1°C en la temperatura del agregado, cambia en aproximadamente 0,5°C la temperatura del concreto. Un cambio de 2°C en la temperatura del agua, cambia en aproximadamente 0,5°C la temperatura del concreto. Un cambio de 4°C en la temperatura del cemento, cambia en aproximadamente 0,5°C la temperatura del concreto.
- Reemplazar parte del agua de mezcla por escarcha de hielo (no trozos).
- Introducir nitrógeno líquido, bien sea en el agua de mezcla o en los camiones mezcladores.
- Incrementar la cuantía de material cementante para mantener la relación a/mc constante, y compensar la pérdida de resistencia por el aumento de agua.
- Usar un retardador de fraguado con el fin de disponer del tiempo adecuado para el transporte, manejo y colocación.

11.5.13 Control de la colocación

La colocación del concreto en caída libre en alturas superiores a 1,5 metros, puede causar segregación, especialmente en mezclas muy fluidas (asentamientos superiores a 100 mm). Las mezclas de bajo asentamiento con aire incorporado y las que contienen aditivos superplastificantes, son más cohesivas y por tanto la segregación es más difícil.

Cuando se funden muros y columnas de gran altura, se pueden salpicar las formaletas y el acero de refuerzo. Cuando el concreto de las salpicaduras se seca, antes de que el concreto fresco lo alcance, la apariencia de la superficie del concreto puede verse afectada; por su parte, las salpicaduras sobre el acero no afectan la adherencia.

Una forma de evitar la segregación por efecto de caída libre del concreto desde grandes alturas, es mediante el uso de mangueras de caucho denominadas “trompa de elefante” (Figura 11.35), medio que impide las salpicaduras.



Figura 11.35. Colocación del concreto con manguera o “Trompa de elefante”

La colocación del concreto se debe realizar en capas uniformes, limitadas al espesor que pueden ser compactadas de manera adecuada. Cada capa se debe colocar antes de que la anterior haya fraguado, evitando la formación de juntas frías. El vibrador debe penetrar ligeramente la capa adyacente para que se forme monolitismo. La Figura 11.36, extractada del ACI 304, muestra otras formas de colocación del concreto que evitan la segregación.

Por su parte, la NSR – 10 establece lo siguiente respecto a la colocación del concreto:

- Se debe depositar lo más cerca posible de su ubicación final, con el fin de evitar la segregación, producto de una excesiva manipulación.
- La velocidad de colocación debe ser tal, que el concreto conserve su estado plástico en todo momento, y fluya fácilmente dentro de los espacios del refuerzo.
- No se debe colocar dentro de la estructura de concreto que haya endurecido parcialmente, o que se haya contaminado con materiales extraños.
- No se debe utilizar concreto al que después de preparado se le adicione agua, ni que haya sido mezclado luego de su fraguado inicial, a menos que sea aprobado por el diseñador del concreto.
- Solo se permite una vez la adición de agua, es decir, en el momento de la preparación de la mezcla.

- La cantidad de agua adicionada no debe sobrepasar los límites del asentamiento especificado.
- La relación a/mc , no debe ser excedida.
- Una vez iniciada la colocación, se debe hacer en una operación continua hasta que se termine la sección, definida por sus límites o juntas predeterminadas.

11.6 Vibración, compactación o consolidación del concreto

En el Capítulo 5 se estudió cómo en la mezcla se atrapa una cantidad de burbujas de aire, que varían tanto en tamaño como en distribución. Se explicó cómo dichas burbujas forman vacíos o poros que hacen el concreto menos compacto, más permeable, menos resistente y menos durable.

La vibración, compactación o consolidación del concreto, es el proceso mediante el cual se expulsa la mayor cantidad posible de aire atrapado de la mezcla. Este proceso se realiza una vez que está colocado en la formaleta. Busca además, que el mortero cubra totalmente el acero de refuerzo para desarrrollar la adherencia entre los dos materiales, y que la armadura quede protegida.

Existen varios procedimientos para compactar el concreto. Su elección depende, fundamentalmente, de la consistencia de la mezcla y del tipo de estructura que se va a construir. El principio general de todos los procedimientos consiste en disminuir la fricción entre los distintos componentes del concreto, entre el concreto y el acero de refuerzo, y entre el concreto y las formaletas. En general, existen dos formas de compactación: manual y por vibración, y en ambos se deben observar las formas correctas de colocación (Figura 11.36).

11.6.1 Compactación manual

La compactación manual resulta adecuada en mezclas de consistencia media, con buen grado de trabajabilidad (mezclas con asentamiento mayor a 50 mm). Se ejecuta generalmente con una varilla de acero y constituye un procedimiento arduo y engorroso, en el que la compactación se logra introduciendo de manera sistemática la varilla en la masa de concreto.

11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto

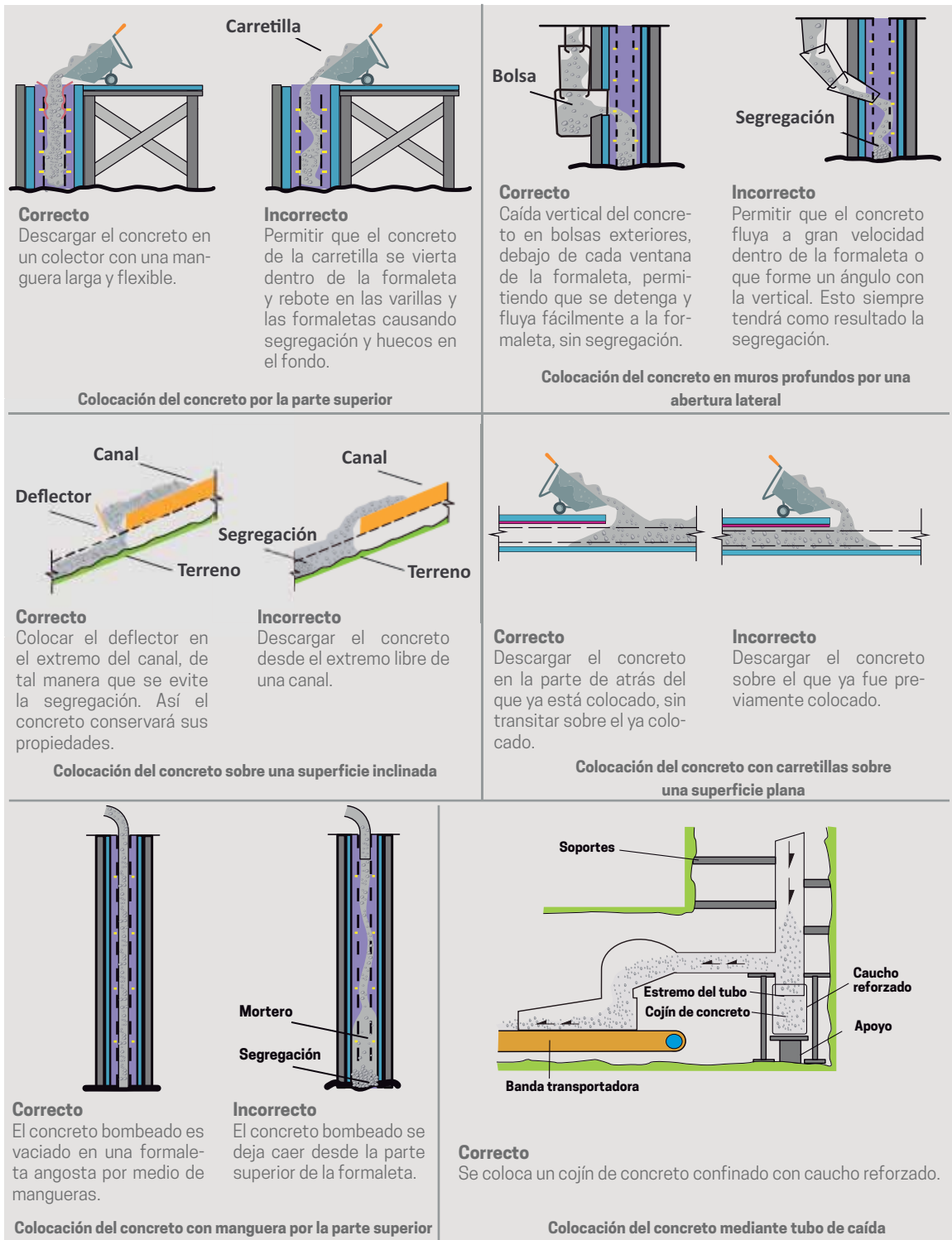


Figura 11.36. Algunos métodos correctos e incorrectos de vaciado del concreto (Adaptado de 11.1)*

Para que el método de compactación manual se realice, es preciso que la varilla tenga la suficiente longitud que permita alcanzar el fondo de la formaleta, o que atraviese el espesor de la capa de vaciado. Además, debe tener un diámetro adecuado que pueda pasar entre las barras de refuerzo y las formaletas. Es recomendable que la varilla sea lisa y de punta redondeada, de tal forma que acomode las partículas más grandes sin desplazarlas al fondo, es decir, sin segregarse la mezcla.

11.6.2 Compactación por vibración

El procedimiento de compactación por vibración es el más utilizado. Consiste en producir en el concreto fresco una agitación, de modo tal que se efectúe una reacomodación de los elementos constituyentes, es decir, que el volumen final sea menor que el volumen ocupado antes de la vibración, cuidando siempre de que no produzca segregación del material. Los equipos de vibración pueden ser de aplicación interna (vibradores de inmersión) o de aplicación externa (vibradores de formaletas, de cerchas o de mesa vibrante). Los vibradores se caracterizan por su frecuencia de vibración, expresada como el número de vibraciones por minuto (rpm), o en unidades de Hertz (Hz). También por su amplitud, que es la desviación con respecto a un punto de referencia, en milímetros.

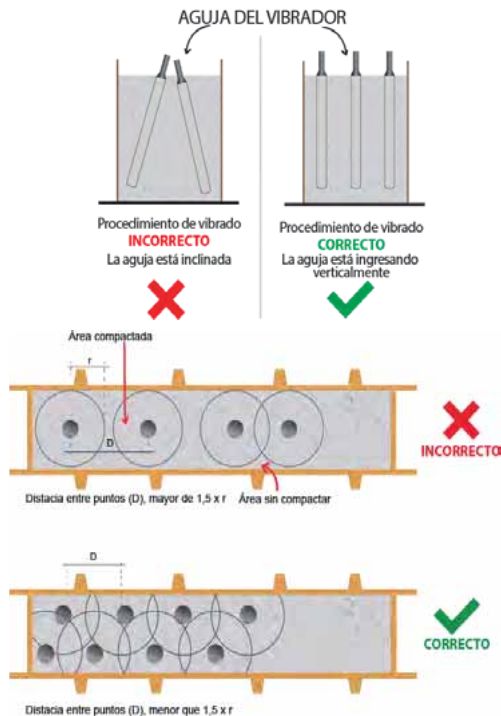


Figura 11.38. Distancia correcta e incorrecta entre los sucesivos puntos de inmersión del vibrador (11.10)

Vibradores de aplicación interna

Los vibradores de aplicación interna o de inmersión o de “aguja”, son tal vez los equipos más usados para consolidar concreto en muros, columnas, vigas y losas. Consisten en un tubo de diámetro externo variable entre 38 mm y 100 mm (1 ½” y 4”), dentro del que se mueve, en forma excéntrica, una determinada masa accionada por un motor a través del eje. Esto genera el movimiento oscilatorio, con determinada amplitud y frecuencia (Figura 11.37).



Figura 11.37. Compactación con vibrador de inmersión †

El vibrado se efectúa introduciendo el aparato en la mezcla, en donde el movimiento oscilatorio es transmitido al concreto. La vibración que se produce en el concreto hace que su masa, inicialmente en estado semiplástico, sufra una reducción de fricción interna como consecuencia de la licuefacción del mortero. En este nuevo estado, el material se reacomoda reduciendo los espacios y expulsando el aire atrapado, obteniendo un material más compacto al que originalmente se tenía sin vibrar.

El proceso de vibrado termina cuando dejan de salir burbujas y aflora en la superficie del concreto una lechada, dándole a la masa un aspecto brillante. Inmediatamente después, se procede a retirar el vibrador lentamente y a velocidad constante, para ser introducido en otro punto.

► 11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto

Puesto que el vibrador de inmersión actúa tan solo en una zona de influencia, en un volumen de concreto de forma aproximadamente troncocónica, es necesario introducir el vibrador en distintos puntos de la masa de concreto y así lograr una consolidación completa (Figura 11.38).

El radio de acción que define esa zona de influencia, depende de la frecuencia del vibrador y de la consistencia de la mezcla (entre más fluida mayor el radio de acción y menor el tiempo de vibración). La Tabla 11.7 muestra algunos valores correspondientes a

Tabla 11.7. Propiedades de vibradores de inmersión con extremo redondeado (11.22)

Aplicación	Grupo	Diámetro cm (pul)	Frecuencia recomendada vib/min (hz)	Radio de acción (cm)	Rendimiento de compactación (m ³ /h)
Concreto de consistencia húmeda. Secciones delgadas. Fabricación de muestras de laboratorio. Vibrado de elementos pretensados, en zonas congestionadas	I	2 a 4 (3/4 - 1 1/2)	10.000 a 15.000 (170 - 250)	8 a 15	0,8 a 4
Concreto de consistencia media, muros delgados, columnas, vigas, pilotes prefabricados, losas delgadas, juntas de construcción	II	3 a 6 (1 1/4 - 2 1/2)	9.000 a 13.500 (150 - 225)	13 a 25	2,3 a 8
Concreto con asentamiento < 75 mm. Construcción en general, muros, columnas, vigas, losas, pilotes	III	5 a 9 (2 - 3 1/2)	8.000 a 12.000 (130 - 200)	18 a 36	4,6 a 15
Concreto en masa y estructural, asentamiento de 35 a 50 mm depositado en grandes cantidades. Columnas y fundaciones grandes	IV	7,5 a 15 (3 - 6)	7.000 a 10.500 (120 - 180)	30 a 51	11 a 31
Concreto en masa para presas de gravedad. Muros macizos	V	12,5 a 17,5 (5 - 7)	5.500 a 8.500	40 a 61	19 a 38

diferentes tipos de vibradores con extremo redondeado, que son los comúnmente usados.

El vibrador se debe introducir verticalmente en la mezcla a intervalos regulares, permitiendo que descienda con lentitud por gravedad y a velocidad constante. Cuando el vaciado se haya realizado por capas, el vibrador se debe introducir hasta que penetre por lo menos 10 cm la capa inferior, de modo que produzca una re-vibración y se obtenga una estructura monolítica, sin juntas de construcción.

La distancia entre los puntos sucesivos de inmersión, debe ser aproximadamente 1,5 veces el radio de acción, de tal manera, que el área afectada por el vibrador traslape una parte del área vibrada previamente (Figura 11.38), asegurando que toda la masa de concreto quede compacta.

El tiempo de vibración en un punto determinado depende de:

- La consistencia de la mezcla (entre más seca, más tiempo).
- La naturaleza de la sección.
- La potencia del vibrador.

El tiempo generalmente se determina experimentalmente, mediante observación directa de la superficie en los alrededores del vibrador. Cuando aflora un reflujo de pasta y cesa el escape de burbujas de aire, se procede a retirar el vibrador lentamente. El tiempo de vibración es un factor clave, puesto que un tiempo muy corto no alcanza a sacar todo el aire atrapado. Por el contrario, un tiempo de vibrado muy alto puede producir segregación de la mezcla. En general, se considera que el tiempo de vibrado varía en un rango comprendido entre 5 y 15 segundos.

Vibradores de aplicación externa

En los vibradores de aplicación externa, como su nombre lo indica, el dispositivo vibrante está colocado sobre una o varias de las caras de la formaleta. Los tipos más corrientes de este sistema de vibración lo constituyen las formaletas vibratorias, mesas vibrantes o superficies vibratorias, como las reglas y platos vibratorios.

Formaletas vibratorias

Dentro de los vibradores de aplicación externa, los más conocidos y ampliamente usados son las formaletas vibratorias (Figura 11.39), diseñadas especialmente para ser parte de las formaletas y transmitir vibraciones al concreto. Sus principales aplicaciones son:

- Consolidar elementos de concreto muy delgados o muy reforzados.
- Completar la vibración interna.
- Consolida mezclas muy secas, donde los vibradores internos no son tan efectivos.



Figura 11.39. Formaleta Vibratoria

Las formaletas vibratorias pueden ser operadas eléctrica o neumáticamente, y se deben espaciar adecuadamente de tal manera que distribuya la intensidad de vibración de forma uniforme. El espaciamiento óptimo debe determinarse de manera experimental mediante observación directa.

En ocasiones puede ser necesario operar algunas de las formaletas vibratorias con diferente frecuencia, buscando la obtención de mejores resultados. Por ello, se recomienda que estén equipadas con controles, reguladores de frecuencia y amplitud. El tiempo de vibración externa es mucho mayor que el de los vibradores de aplicación interna, variando generalmente entre uno y dos minutos.

Es recomendable que el elemento vibrador de las formaletas vibratorias no esté ubicado en el extremo superior de las formaletas verticales, toda vez que la vibración en elementos delgados o inadecuadamente reforzados, causan un movimiento hacia adentro y hacia afuera, que puede crear un espacio entre el concreto y la formaleta. En tal caso, y complementando la vibración en dichas zonas, se pueden utilizar vibradores internos.

En elementos muy reforzados, donde se hace difícil la introducción de vibradores internos, se puede recurrir al método de vibración de las barras del acero de refuerzo en la estructura. El procedimiento consiste en enganchar la formaleta vibratoria a los extremos de refuerzo expuestos y efectuar la vibración. Esta práctica reacomoda el material, sacando el aire atrapado e incrementando la adherencia entre las barras y el concreto.

Mesas vibratorias

Las mesas vibratorias son muy empleadas en plantas de prefabricados. Consisten en un tablero rígido, apoyado en soportes fijos



Figura 11.40. Mesa vibratoria

11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto

elásticos. Generalmente están equipadas con controles que regulan su frecuencia y amplitud, dependiendo del elemento que se va a hacer vibrar y la consistencia de la mezcla (Figura 11.40).

El tablero de la mesa debe ser lo suficientemente rígido, buscando que no se deforme durante la vibración. Si esto ocurre, se tiene una deficiente compactación, pues fue realizada de manera no uniforme. Lo que implica que no deben prefabricarse elementos con un tamaño superior al de la mesa.

Reglas vibratorias

Las reglas vibratorias son utilizadas especialmente en la consolidación de concreto en pisos y losas para pavimentos (Figura 11.41). Están provistos de un operador de control de nivelación que ayuda, en buena medida, a la labor. El principio de las reglas vibratorias es el compactar el concreto desde la superficie de las losas.

El uso de estos equipos no es recomendable en la consolidación de mezclas con asentamientos mayores a 75 mm, debido a que durante la operación acumulan un exceso de mortero y material fino en



Figura 11.41. Regla vibratoria *

la superficie, que al endurecer, reduce la resistencia al desgaste de la losa. Por esta misma razón, las reglas vibratorias no deben ser operadas una vez que el concreto haya sido adecuadamente colocado.

La compactación adecuada con una regla vibratoria se logra en dos pasadas: la primera compacta la mezcla y la segunda le confiere el acabado. Existen reglas vibratorias dobles que, con una sola pasada, efectúan las dos acciones.

El espesor máximo recomendado para consolidar losas con regla vibratoria es de 250 mm, en la medida que no sean reforzadas o que apenas tengan un

refuerzo sencillo, como una malla. Si son capas más gruesas o con refuerzo, es conveniente efectuar primero una compactación con vibrador interno y luego pasar la regla vibratoria.

La longitud máxima recomendada de las reglas vibratorias es de 4,5 metros. Una longitud mayor puede ocasionar superficies cóncavas por el efecto del peso propio y del motor. Este efecto se puede presentar, aun cuando la mayoría de equipos cuentan con alambres tensores, que contrarrestan la deflexión generada.

Compactación por rodillos

Tal como se estudió en el Capítulo 9, la técnica del concreto compactado con rodillo exige que la consolidación se realice justamente mediante rodillos, que pueden ser lisos estáticos, o lisos vibratorios.

La compactación se realiza dependiendo del peso del equipo, el número de pasadas, el número y diámetro de los cilindros (ruedas), y la velocidad de desplazamiento (generalmente que no exceda los 4 km/h), entre otros.

Finalmente, es conveniente resaltar que el vibrado del concreto permite alcanzar mejores resultados en la compactación que el método manual, tal como se enseña en la Figura 11.42.

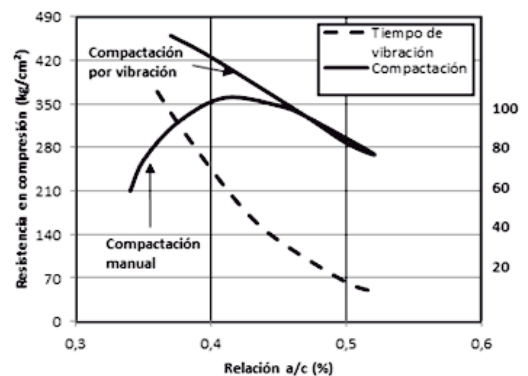


Figura 11.42. Comparación de la eficiencia entre la compactación por vibración y la compactación manual (11.21)

11.7 Terminado o acabado del concreto

Surtidos los procesos de colocación y compactación, se debe realizar el procedimiento de acabado o terminado, cuyo objeto es darle a la superficie de la estructura la apariencia requerida.

En general, se tienen dos tipos de superficies que emplean métodos diferentes en su acabado: superficies cuya cara expuesta no lleva encofrado, y superficies con cara que va a terminar y llevan encofrado.

11.7.1 Acabado de superficies sin encofrado

Las superficies típicas que no tienen encofrado en la cara expuesta para terminar, son las losas de pisos y pavimentos. En este caso existen varias maneras de realizar el proceso, dependiendo del uso o del servicio que vayan a prestar. Los siguientes son los procesos normalmente seguidos.

Nivelación o enrasado

Es el proceso de corte del exceso de concreto, buscando el nivel requerido (Figura 11.43). Se puede realizar manualmente, utilizando una regla con su borde inferior recto o curvado, dependiendo de la especificación. Requiere de un exceso de concreto en las partes que se van a nivelar, de modo que, cuando se realice o el movimiento de aserrado con la regla sobre la superficie, se vayan llenando las zonas que presentan baches. Algunas reglas están provistas de vibradores, que además de ayudar a la compactación, facilitan el enrasado.



Figura 11.43. Enrasado del concreto mediante regla †

Aplanado

El aplanado se realiza inmediatamente después del enrasado, teniendo como fin, eliminar los puntos altos y bajos y embeber los agregados gruesos

que puedan sobresalir de la superficie. En esta labor se emplean llanas o aplanadoras, también conocidas como flotadoras o alisadoras, que pueden ser de madera o metal (aluminio o magnesio). Las de madera dejan una superficie más rústica que las metálicas (Figura 11.44).

El proceso de aplanado debe realizarse lo más pronto posible, evitando que el agua de exudación se acumule sobre la superficie. El exceso de aplanamiento puede causar exudación del concreto, resultando superficies poco durables.



Figura 11.44. Aplanado del concreto con flotadora †

Emparejado

La labor de emparejado tiene los siguientes propósitos:

- Insertar las partículas de agregado que se encuentren cerca de la superficie.
- Eliminar pequeñas imperfecciones de la superficie, como protuberancias o vacíos.
- Compactar el mortero de la superficie, preparándola para otras operaciones de acabado.

Las herramientas usadas para el emparejado son llanas manuales (madera, metálicas o de fibra de vidrio) o máquinas provistas de palas para emparejar y cuchillas, también conocidas en el medio como "helicópteros" (Figura 11.45).

11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto



Figura 11.45. Emparejado del concreto mediante “helicóptero” †

El emparejado produce una superficie uniforme pero rústica, que puede resultar adecuada para superficies con resistencia al deslizamiento, como losas exteriores. Por el contrario, algunas requieren de superficies más pulidas, por ello que puede ser necesario una segunda emparejada con llana.

Al igual que el aplanado, el emparejado se debe realizar sin exceso evitando que se produzca exudación y los problemas de durabilidad que conlleva.

Alisado

El alisado es una operación que se realiza cuando se requiere una superficie dura, lisa (suave) y densa (Figura 11.46). No se debe hacer sobre superficies sin emparejar, y puede requerir de una o dos pasadas. Al efectuar esta labor, es necesario que el concreto haya endurecido, para evitar que el agua de exudación aflore a la

superficie. Las herramientas que se deben usar son llanas metálicas manuales, aunque también las hay eléctricas.



Figura 11.46. Alisado de piso con llana metálica †

Cepillado

El cepillado es un proceso que se realiza principalmente a losas de pavimentos de concreto, buscando dos propósitos: dotar a la superficie de mayor agarre para mejorar la resistencia al deslizamiento, y facilitar la evacuación del agua en el pavimento.

Se realiza de forma transversal a la dirección del tránsito (Figura 11.47) y antes de que el concreto haya endurecido, pero cuando se encuentre lo suficientemente duro para que quede marcada la huella del cepillo. Se puede realizar con un rastrillo o con una escoba de cerdas duras y gruesas.



Figura 11.47. Cepillado del concreto †

Estampado

Una de las técnicas que ha venido incrementando su empleo es la técnica del estampado (Figura 11.48). Con la ayuda de moldes, pigmentos, herramientas especiales y ácidos, se logran replicas en concreto de cualquier textura o material, como madera, piedra y mármol; entre muchas otras. Los moldes generalmente son de caucho (látex) y se colocan sobre la superficie una vez el concreto ha fraguado y pueda soportar sobre la superficie un molde labrado, que pueda penetrar sin que el concreto se deforme o desportille.



Figura 11.48. Algunas formas y texturas del concreto ❖

11.7.2 Acabado de superficies con formaleta

Normalmente las superficies de concreto desencofradas no requieren de tratamiento alguno, cuando el proceso de construcción fue realizado cuidadosamente y con las formaletas adecuadas.

El acabado del concreto con formaleta puede ser liso o estampado (texturizado). Las superficies lisas se logran con formaletas metálicas, revestidas de plástico reforzadas con fibra de vidrio, o formaletas de fórmica. Y las superficies con texturas se logran con formaletas grabadas, en relieve o realizando algún tipo de tratamiento luego de remover la formaleta.

La técnica del agregado expuesto provee una gran variedad de texturas, colores y visos. La selección de los agregados, color, tamaño, textura, granulometría y limpieza, es un factor clave para el resultado final. Los métodos de exposición del agregado requieren el uso de un retardante de fraguado, seguido de un lavado y cepillado, luego de desformale-

teada la estructura. También se pueden usar martillos neumáticos, que ayudan a remover la capa de mortero, técnica conocida como “abujardado” (Figura 11.49). Otra técnica es la de producir el acabado con el lavado y cepillado, mediante la aplicación de ácido clorhídrico diluido. El chorro de agua con alta presión, también permite exponer el agregado, cuando el concreto ya ha endurecido.



Figura 11.49. Concreto abujardado ❖

En el capítulo de concretos especiales se estudiaron los concretos de color. Se vio cómo los acabados coloreados son una práctica frecuente para aplicaciones internas y externas. Tales aplicaciones se pueden realizar mediante las siguientes técnicas:

El método integral (en una capa), se logra adicionando pigmentos a la mezcladora para producir un color uniforme. Como se estudió en el Capítulo 9, los pigmentos (naturales o sintéticos) deben ser insolubles en agua, estar libres de ácidos y sales, ser resistentes a los rayos UV y estables en la presencia de los álcalis y ácidos débiles; no contener cantidades apreciables de sulfatos de calcio, y tener una finura tal, que el 90%, pase el tamiz de 45 μm . Además, la cantidad máxima de pigmento no debe exceder el 10%, por peso de cemento.

En el método de dos capas, se deja una base con una textura rugosa, para una adecuada adherencia con la capa de revestimiento coloreada. Si la capa base endureció, hay que colocar sobre esta un puente de adherencia, consistente en un mortero del mismo material (relación cemento: arena de 1:3 ó 1:4) o un epóxico, previo a la colocación de la capa

► 11 Producción, transporte, colocación, compactación y terminado del concreto

de revestimiento, cuyo espesor varía entre 13 y 25 mm.

Por el método de polvo rociado en seco, el material coloreado, pre-empacado en seco, se moldea sobre una superficie de la losa de concreto. El material de polvo rociado en seco, es aplicado luego de los procesos de enrase y aplanado, y que el agua de exceso se haya evaporado.

Por otra parte, la técnica de pintura es usada cuando se necesite colorear el concreto existente, bien sea para cambiar el color, mantenimiento o protección (Figura 11.50). Es permitido aplicar pinturas como las base de cemento Pórtland, cemento modificado con látex, pinturas de látex y acrílicas. Por su parte, las pinturas con base en silicatos, también conocidas como pinturas minerales, son aquellas que reaccionan químicamente con el cemento y se caracterizan por tener alta durabilidad, excelente permeabilidad al agua, vapor e, incluso, una resistencia al fuego equivalente a la del concreto. La correcta aplicación de cada tipo de pintura debe seguir las instrucciones del fabricante; entre otras cosas, para que el color quede uniforme.

Existen otras muchas técnicas para lograr concretos con diferentes acabados en la superficie. Cualquiera que sea el método empleado, se debe realizar una prueba de campo, con el fin de ver el resultado final, con base en los materiales, las herramientas, la aplicación de la técnica, los tiempos y las diferentes etapas en que se debe hacer. Esto permitirá afinar los detalles y obtener la aprobación del terminado, tanto por el arquitecto, como por el dueño del proyecto.

11.8 Referencias y bibliografía recomendada

11.1. ACI. Committe 304R. Recommended Practice For Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete. Detroit, Yona D. Kahn, 2000.

11.2. ACI 301S. Especificaciones para Concreto Estructural. Farmington Hill, MI. ACI, 2010.

11.3. ACI - AMERICAN SOCIETY OF CONCRETE CONTRACTORS. Guía del Contratista para la Construcción en Concreto de Calidad. Farmington Hill, MI. ACI, 2005.

11.4. ASOCIACIÓN DE INGENIERÍA SÍSMICA. Regla-

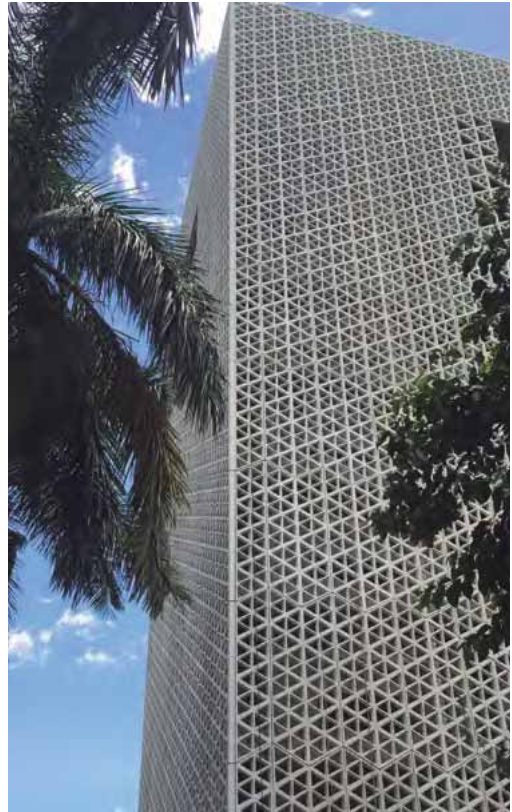


Figura 11.50. Concreto con pintura mineral
Obra Edificio EDU-Constructora Conconcreto, Medellín *

mento Colombiano de Construcción Sismo Resistente – NSR – 10. AIS, Bogotá, 2011.

11.5. CAÑAVERA, Juan. Notas sobre Producción de Concreto Premezclado. Bogotá, Central de Mezclas, 1986.

11.6. CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. Concrete Technology and Construction, Batching and Mixing, London, Cement and Mixing, London, Cement and Concrete Association, 1984.

11.7. CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. Concrete Technology and Construction, Concrete Handling and Placing, London, Cement and Concrete Association, 1984.

11.8. CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. Concrete Technology and Construction, Concrete Production, London, Cement and Concrete Association, 1984.

11.9. CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. Concrete Technology and Construction, Compaction, London, Cement and Concrete Association, 1984.

11.10. CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. Concrete Technology and Construction, Compaction and Finishing, London, Cement and Concrete Association, 1984.

11.11. CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. Concrete Technology and Construction, Production and Supply of Ready-Mixed Concrete, Association, 1984.

11.12. CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. Concrete Technology and Construction, Placing and Compacting Concrete, London, Cement and Concrete Association, 1984.

11.13. EUROPEAN READY MIXED CONCRETE ORGANIZATION. Código de Buena Práctica para el Hormigón Preparado, Barcelona, 1979.

11.14. GIAMMUSSO, S. E. Hormigón Elaborado. Instituto del Cemento Pórtland Argentino, Buenos Aires, 1980.

11.15. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC. NTC 3318 Concreto Premezclado, primera actualización. Bogotá, 1994.

11.16. INSTITUTO CHILENO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN. Manual del Hormigón, Santiago, 1984.

11.17. INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. Práctica Recomendable para la Medición, Mezclado, Transporte y Colocación del Concreto. Traducción del documento ACI 614 59. México D.F., Ed. Abeja, 1977.

11.18. MANGEL, S. y SEELING R. Preparación y Empleo del Hormigón. Barcelona, Gustavo Gili, 1976.

11.19. MATA LLANA, R. Fundamentos de Concreto Aplicados a la Construcción. ICPC, Medellín, 2007.

11.20. NEVILLE, A.M. Tecnología del Concreto. México, IMCYC, 1999.

11.21. ORCHARD, D.F. Concrete Technology, Vol. 2. CR Books Ltd. London, 1968.

11.22. PORRERO, I., RAMOS, C y GRASES, I. Manual del Concreto Fresco. Caracas, Comité Conjunto del Concreto Armado, 1975.

11.23. PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. México D.C, IMCYC, 2004.

corona



Corona Industrial es una multinacional colombiana con más de **135 años** de historia empresarial dedicada a la manufactura y comercialización de productos para el hogar, la construcción, la industria, la agricultura y el sector de energía. Está compuesta por cuatro Divisiones de Negocios - Baños y Cocinas; Superficies, Materiales y Pinturas; Insumos Industriales y Energía; y Mesa Servida - y dos Unidades Comerciales que son Almacenes Corona y Comercial Corona Colombia.

Corona cuenta con **20 plantas** de manufactura en Colombia, **3** en Estados Unidos, **3** en Centroamérica y **3** en México, así como con una oficina de suministros globales en China. En alianza con Cementos Molins de España, se encuentra desarrollando a través de Empresa Colombiana de Cementos el negocio para la producción y venta de cemento en Colombia. Genera más de **9.000 empleos** y exporta sus productos a diversos mercados alrededor del mundo, incluyendo Estados Unidos, Canadá, México, Brasil, Chile, Centro América, el Caribe, Italia, España y el Reino Unido.

www.corona.co

Constructora Conconcreto

Lo que nos **DIFERENCIA**

Quiénes SOMOS

Somos una constructora preparada para ejecutar proyectos de clase mundial. Pioneros en la sostenibilidad, industrialización y métodos constructivos eficientes. Cerca de 60 años de excelencia en nuestra gestión nos ha permitido invertir en nuestro talento humano, innovación y buenas prácticas operativas.

Puerto Industrial Agudulce y terminal de granos y carbón fase I
Buenaventura, Valle del Cauca. >

Experiencia y solidez patrimonial que nos permiten participar en megaproyectos públicos y privados.

Innovación enfocada en la eficiencia para disminuir tiempo y costos.

Altos estándares de **seguridad**, salud en el trabajo y **prevención de riesgos**.

Portafolio de inversiones que genera ingresos a largo plazo para sostenibilidad en el tiempo.

Capacidad técnica y humana Capacitamos y desarrollamos a nuestros empleados.

Reputación, confianza y buenas prácticas de **gobierno corporativo**.

Más de 20 años de **presencia internacional**.

Aliados especializados de trayectoria para la generación de valor.

Presencia en



Nuestra estrategia de internacionalización tiene como foco a Centroamérica y la Región Andina, a través de la identificación de oportunidades de negocio y aliados especializados que aportan valor.



www.conconcreto.com

GRUPO ARGOS
PACTIA

VINCI

SALFACORP

comargo correa infra



12 Curado del concreto

El curado del concreto es de suma importancia y a pesar de esto no se le presta suficiente atención

Luego de las operaciones de colocación, compactación y acabado, el proceso de curado se constituye en el último paso para lograr las características deseadas en el concreto.

Tal como se ha venido insistiendo a lo largo de los capítulos precedentes, la realización del curado es absolutamente indispensable. Su correcta ejecución también es clave en el proceso. Sin embargo, a pesar de su importancia, es muy común que no se le preste la atención que reviste.

No obstante, en este capítulo en particular, son resaltados nuevamente los aspectos que determinan la importancia de su realización, mostrando los fundamentos del proceso, y los factores que influyen para su logro. Así mismo, se presentan las recomendaciones en cuanto a métodos, procedimientos y materiales comúnmente empleados para llevarlo a cabo de forma adecuada.

El Comité ACI 308 *Standard Practice For Curing Concrete*, hace un informe detallado sobre el tema, proporcionando prácticas recomendadas, muchas de ellas se han adoptado en este capítulo.

12.1 Fundamentos e importancia del curado

En el capítulo de cemento se explicó cómo el grano de cemento requiere varios días, incluso años, para lograr su total hidratación en presencia de humedad constante. Además, que el desarrollo adecuado del

proceso de hidratación del cemento, conduce a la obtención de las propiedades esperadas en el concreto, bajo una temperatura adecuada. Estas son las razones por las que es necesario suministrar agua al concreto, luego del proceso de acabado y fraguado, principalmente durante las primeras edades.

El curado del concreto se puede definir como el proceso mediante el cual, este se mantiene con un contenido de humedad adecuado y permanente, y una temperatura favorable durante la hidratación del cemento, para que se desarrollen las propiedades deseadas.

Por lo anterior, es imperativo realizar en todas las estructuras de concreto, iniciando el proceso lo más pronto posible, y mantenerlo hasta que alcance, por lo menos el 70% de la resistencia especificada ($f'c$). En general, y como se aprecia en la Figura 12.1, el mayor potencial de hidratación es obtenido en las primeras edades, y se observa claramente en la evolución de la curva de resistencia, razón por la cual la atención prestada al curado durante esta etapa, será fundamental en el desarrollo de las propiedades del concreto.

12 Curado del concreto

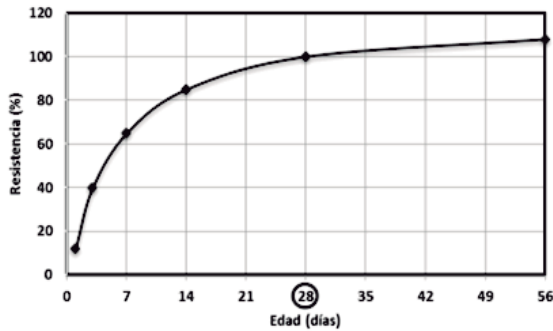


Figura 12.1. Desarrollo de la resistencia del concreto con la edad

Se deduce que el curado es primordial en la obtención de concreto de calidad, puesto que no solo la resistencia potencial se desarrolla completamente cuando es curado durante el tiempo necesario, antes de ser puesto en servicio, sino que también es fundamental en el logro de una adecuada durabilidad y baja permeabilidad.

Como la hidratación de los granos de cemento solo se realiza en presencia de agua, es necesario suministrarle una cantidad tal, que permita mantenerlo saturado, o tan saturado como sea posible, durante las edades tempranas de endurecimiento. Así mismo, el saturar el concreto durante un determinado tiempo después del fraguado, consigue mantenerlo a una temperatura adecuada, de manera que la hidratación de los granos de cemento se realiza en forma regular.

La Figura 12.2 muestra cómo la hidratación parcial desarrolla bajas resistencias, proporcionales al tiempo de curado, lo que permite ver la gran diferencia que existe entre curar permanentemente y no curar.

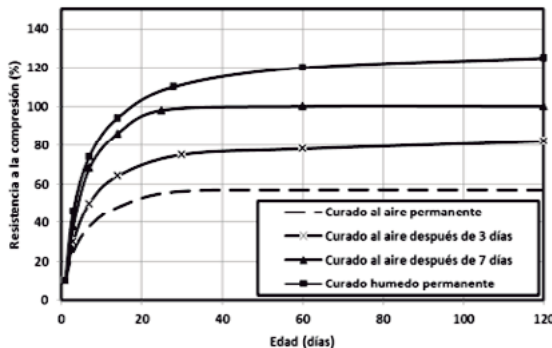


Figura 12.2. Desarrollo de resistencia con la edad para diferentes tiempos de curado (12.1)

Pruebas de laboratorio muestran cómo al interrumpir el suministro de agua de curado, el desarrollo de la resistencia continúa por un tiempo corto pero luego se detiene. Y si el proceso se reanuda, el desarrollo de la resistencia puede ser reactivado. Sin embargo, esto es válido para condiciones controladas, siendo muy difícil que suceda lo mismo con el concreto puesto en obra. Luego, la recomendación es que el proceso de curado debe ser continuo y realizarlo una vez haya fraguado el concreto.

12.2 Factores para un buen curado

Para un buen curado se requieren tres factores: un contenido adecuado de humedad, una temperatura apropiada y un tiempo prudente con un método idóneo.

12.2.1 Contenido adecuado de humedad

Como se explicó en el Capítulo 4, la cantidad de agua de mezclado en el concreto al momento de su colocación, es mayor que la requerida en la hidratación del cemento. No obstante, la pérdida excesiva de agua de mezclado debido a la evaporación, puede alcanzar valores por debajo de la cantidad necesaria para la adecuada reacción del cemento. Las superficies de las estructuras son particularmente las más afectadas, puesto que es la zona que primero se seca.

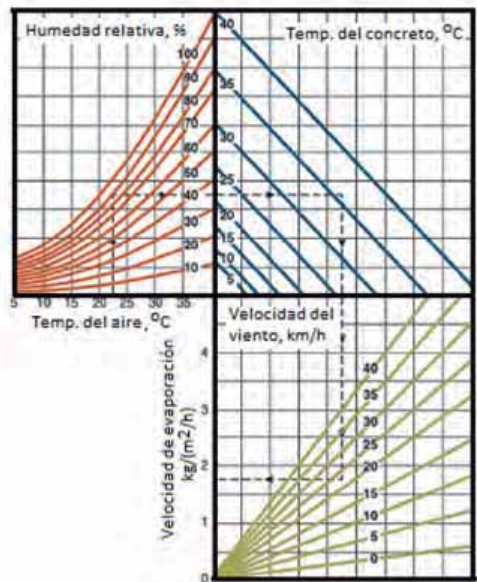


Figura 12.3. Cantidad de agua evaporada en la superficie del concreto no protegido o curado (12.1)

La evaporación del agua depende fundamentalmente de la temperatura del aire, la humedad relativa, la temperatura del concreto y la velocidad del viento. Estos factores se han correlacionado y graficado en el denominado Diagrama de Menzel (Figura 12.3), el cual se puede emplear para determinar, con suficiente aproximación, la cantidad de agua que se evapora en el concreto, expresada en kilogramos de agua (litros), por metro cuadrado de área expuesta de concreto fresco, durante 1h (kg/m²/h).

La rápida pérdida de agua en la superficie, da como resultado el agrietamiento plástico del concreto, con fisuras típicas como las mostradas en la Figura 12.4. Las estructuras más susceptibles a este fenómeno son las que tienen una superficie expuesta grande, como son las losas de pavimento, losas aéreas, las paredes de un canal, los tableros de los puentes y los pisos industriales, entre otros.



Figura 12.4. Agrietamiento plástico en un pavimento de concreto, debido a una rápida pérdida de humedad en la superficie y exudación †

Además de los factores anotados, existen otros que pueden ayudar a la pérdida de agua en la mezcla. Este es el caso de la absorción de los agregados, cuando no es tenida en cuenta en el diseño de mezcla, y la absorción de la formaleta o el suelo. La evaporación se puede evitar mediante el curado. Los efectos de la absorción se mitigan con la adecuada dosificación de agua, teniendo en cuenta el ajuste en el diseño de la mezcla y la absorción de las formaletas mediante saturación previa al vaciado del concreto, o con el uso de formaletas no absorbentes como fibra de vidrio o metálica.

12.2.2 Temperatura apropiada

La temperatura afecta la velocidad de reacción entre el cemento y el agua. Si la temperatura es favorable, la hidratación es relativamente rápida en los primeros días. Por ello, se debe evitar la evaporación durante este periodo.

La temperatura deseable del concreto, para maximizar sus propiedades, se encuentra por encima de los 10 °C. El desarrollo de la resistencia inicial por debajo de 10 °C es lento, por debajo de 5 °C presenta un apreciable retardo, y por debajo de -5 °C, es prácticamente nulo. Por el contrario, una temperatura elevada de la mezcla acelera las reacciones químicas de hidratación, afectando en forma benéfica la resistencia inicial, pero la afecta adversamente a mediano y largo plazo, toda vez que se forman productos de hidratación pobres, e incluso daños, tal como se estudió en el Capítulo 11. Además, las temperaturas altas de curado también promueven ganancias de resistencia a temprana edad, pero pueden decrecer luego de 28 días, tal como se aprecia en la Figura 12.5.

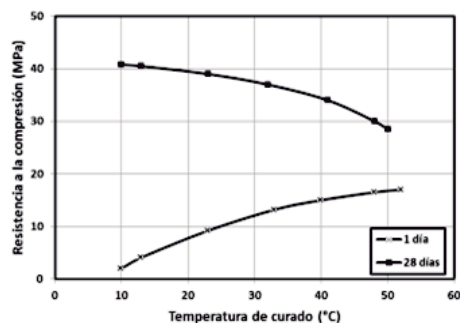


Figura 12.5. Efecto de la temperatura de curado en la resistencia del concreto (12.1)

La temperatura del concreto en el momento de la colocación depende de la temperatura inicial de los materiales, del aire circundante, de la absorción del calor solar, y del calor de hidratación del cemento. En consecuencia, el curado del concreto debe ser especialmente cuidadoso en zonas de altas temperaturas, baja humedad relativa, alta velocidad del viento y, en particular, en elementos con gran superficie expuesta, pues son más susceptibles a la evaporación del agua.

Una diferencia muy alta de temperatura entre el agua de curado y el concreto, puede generar choque térmico o gradientes agudos de temperatura, conduciendo a la generación de esfuerzos de tracción y eventual fisuración. El ACI 308 recomienda que esta diferencia no sea mayor a 11 °C

Tiempo adecuado

Para obtener un buen curado es necesario que tanto la temperatura como la humedad se mantengan de forma continua durante un tiempo adecuado. En general, el tiempo de curado requerido depende de las características del medio ambiente que rodea al elemento (temperatura, velocidad del viento, humedad relativa), las características de la obra y la dosificación y tipo de cemento.

En general, para estructuras expuestas a temperatura ambiente superior a 4 °C, el periodo mínimo de curado recomendado es de siete días, o el tiempo necesario para obtener el 70% de la resistencia a la compresión especificada. Si el concreto se coloca a una temperatura ambiente menor o igual a 4 °C, se deben tomar las precauciones del caso, tratando de evitar los daños por congelamiento y asegurar las condiciones de hidratación del cemento. Cuando se trata de elementos de alta resistencia, el tiempo de curado se puede prolongar a 28 días o más, con el fin de permitir el desarrollo de la resistencia potencial.

En el caso de concreto masivo, es conveniente iniciar el curado tan pronto como el concreto haya endurecido lo suficiente, evitando daños en la superficie. En estructuras no reforzadas que no contengan materiales cementantes suplementarios, es recomendable mantener el proceso por dos semanas, y por tres en aquellas que sí las tengan. En juntas de construcción, lo ideal es prolongar el curado hasta que vuelva a iniciar la colocación del concreto, o hasta terminar el periodo de curado requerido.

12.3 Normativa

La NSR - 10 establece requisitos mínimos de temperatura, humedad y tiempo en el curado acelerado y no acelerado.

12.3.1 Curado no acelerado

La NSR - 10, establece que el concreto debe estar a una temperatura por encima de los 10 °C y en condiciones de humedad, por lo menos durante los primeros 7 días después de la colocación. Para el caso del concreto de alta resistencia inicial, el tope está por encima de 10 °C, y como mínimo los 3 primeros días.

12.3.2 Curado acelerado

La Norma permite el uso de métodos acelerados de curado, ya sea para elementos prefabricados o en los construidos en la obra. Establece que el curado con vapor a alta presión, vapor a presión atmosférica, calor y humedad, u otro método aceptado, se puede emplear para acelerar el desarrollo de la resis-

tencia y reducir el tiempo de curado.

El curado acelerado debe proveer una resistencia a la compresión del concreto, por lo menos igual a la resistencia de diseño requerida en cada etapa de carga del elemento.

El procedimiento de curado debe ser tal, que produzca un concreto con una durabilidad equivalente, a la que se obtiene usando los métodos de curado no acelerado.

En cualquier caso, el diseñador puede requerir ensayos complementarios de resistencia para comprobar que el curado es idóneo.

12.4 Métodos y materiales para el curado

Existen diversos materiales y procedimientos para la realización del proceso de curado, que se pueden aprovechar en diferentes condiciones y tipos de estructuras. Sin embargo, la efectividad de un determinado método, depende de las circunstancias específicas de la estructura. Pero si se aplica a otra obra, en condiciones diferentes, los resultados pueden no ser los mismos. De cualquier modo, la efectividad de los métodos de curado dependerá de la prontitud y de su correcta aplicación.

A pesar de que existe gran variedad de métodos y materiales para realizar el tratamiento de curado, los principios involucrados son siempre los mismos, esto es: mantener un suministro de agua adicional que asegure la hidratación del cemento, y mantenga el concreto a una temperatura tal, que permita desarrollar buenas características.

Los procedimientos están clasificados en dos grupos: tratamientos húmedos, y tratamientos para evitar la pérdida de humedad en la superficie del concreto. La escogencia del método apropiado depende del tamaño y condiciones de la obra, la forma y posición de la estructura, así como de la mano de obra y los materiales disponibles para efectuar el tratamiento.

12.4.1 Tratamientos húmedos externos

Estos métodos se basan en el suministro continuo o frecuente de agua, que se realiza de forma externa, mediante métodos clásicos de saturación o inmersión, rocío o riego

de agua, cubiertas de material absorbente saturado, tierra, arena, aserrín, paja o por medio de vapor de agua.

Saturación o inmersión

Este método es tal vez el más completo, pero a la vez, el menos utilizado por la dificultad que presenta al ejecutarse en algunas estructuras. Consiste en la inmersión total en agua de la estructura terminada; es ideal para piezas pequeñas prefabricadas, en losas, alcantarillas, pavimentos y techos horizontales, entre otros.

Para elementos prefabricados, se pueden sumergir las piezas dentro de un estanque con agua a la temperatura adecuada, como ocurre con el curado de los cilindros de concreto (Figura 12.6). En el caso de estructuras como pavimentos y losas, se puede inundar la superficie creando un borde impermeable en los extremos de la estructura. Hay que tener cuidado que el agua no penetre la base o afecte otras construcciones u objetos.



Figura 12.6. Curado †
Izquierda: inmersión. Derecha: inundación

Rocíos o riegos de agua

El rocío de agua por medio de dispositivos de riego (Figura 12.7), proporciona un excelente curado cuando se tienen altas temperaturas. Los dispositivos de riego giratorios son efectivos cuando no haya peligro de escurrimiento fuera del área por curar.

Cuando se trata de superficies inclinadas o verticales, lo ideal es el uso de chorro de agua con manguera, teniendo cuidado de que la presión no provoque erosión en la superficie.



Figura 12.7. Curado de superficie vertical mediante riegos de agua †

Cubiertas de material absorbente

El tratamiento de curado se puede efectuar de manera práctica, colocando sobre la superficie cubiertas de material absorbente, como costales, mantas de algodón o de estopa, y mantenerlos saturados con agua, para conservar constantemente húmeda la superficie de la estructura (Figura 12.8).

Para que este método sea efectivo, lo recomendable es que los materiales de cubierta no se sequen, toda vez que se invierte el proceso, pues serán estos elementos los que absorban humedad del concreto. Antes de retirarlos, es conveniente dejarlos secar completamente, al término del periodo de curado establecido, para que el concreto se vaya secando paulatinamente.



Figura 12.8. Curado con manta absorbente †

En Colombia es muy frecuente el uso de costales. Para su empleo, se debe verificar previamente si fueron usados empaques de productos, tales como panela, fertilizantes, material vegetal, o cualquier otro material que afecte las propiedades del concreto (Figura 12.9). Se recomienda efectuarles un buen lavado con agua, con el que además de eliminar las sustancias solubles, hace que sean más absorbentes. Así mismo, para que los costales cumplan de la mejor forma posible con su función en el proceso de curado, se recomienda tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Cuando es necesario guardar el costal para volverlo a utilizar, es conveniente tratarlo para evitar su putrefacción o que no sea fácilmente atacado por el fuego.
- El peso del costal es importante, puesto que, entre más pesado mayor será su retención de agua y requerirá menor frecuencia de mojado. Además el viento no lo levantará fácilmente.
- La mejor retención de humedad se logra cuando se colocan en dos capas.
- El traslape de las tiras de costal debe ser hasta la mitad de su ancho. De esta manera se garantiza humedad uniforme en el elemento, evitando además, que se levanten con el viento.



Figura 12.9. Curado con costales †

El uso de alfombras, mantas de algodón y elementos similares, a pesar de retener el agua durante más tiempo que el costal y con menos riesgos de secarse, no es muy frecuente en Colombia. El manejo dado a estos materiales es similar a los costales. No obstante, debido a su mayor peso, no es recomendable su colocación sobre una superficie recién fraguada, debiéndose esperar a que el concreto tenga un grado de endurecimiento adecuado.

Tierra

El curado con tierra mojada es adecuado para losas o pisos pequeños. La tierra debe estar libre de partículas mayores de 25 mm, así como de materia orgánica u otras sustancias que puedan causar daño a la superficie. Este método no es muy utilizado, entre otras cosas, por la suciedad y mal aspecto dado a la estructura.

Arena y aserrín

El curado con aserrín o arena limpia, generalmente se utiliza de la misma forma que se hace con la tierra. Hay que procurar especial cuidado con el empleo del aserrín que contiene cantidades excesivas ácido tánico, puesto que deteriora la superficie del concreto.

Las capas aplicadas de tierra, arena o aserrín con las que se obtienen buenos resultados son, por lo general, de aproximadamente 10 cm de espesor. Así mismo, mantener constantemente húmedos estos materiales es clave, no solo para el éxito del curado, sino para evitar que el viento se los lleve.

Paja o heno

El uso de paja o heno mojados, como elemento de curado, requiere tener en cuenta los siguientes aspectos.

- Hacer capas de por lo menos 15 cm de espesor.
- Cubrirlo con una malla de alambre u otro material, evitando que el viento los levante.
- No dejarlos secar, por el riesgo de que se quemen.
- Pueden causar decoloración en la superficie de la estructura, circunstancia que puede permanecer hasta varios meses luego de haber sido retirados.

Curado con vapor

El aumento de temperatura de curado del concreto, incrementa la velocidad de desarrollo de resistencia, por lo que se puede usar vapor. Este método resulta apropiado donde se necesite el desarrollo de altas resistencias a temprana edad, o donde se requiera la aplicación de calor para lograr la hidratación del cemento, como sucede en climas fríos.

No obstante, con el aumento de temperatura de curado, las resistencias a largo plazo son menores. Por ello, el curado con vapor se debe realizar sobre elementos cuya resistencia a edades posteriores no revistan mayor importancia.

El curado con vapor es muy utilizado por la industria de los prefabricados, buscando fundamentalmente ventajas económicas, a través de:

- Mover y enviar a la obra los elementos, lo más

pronto posible luego de vaciarlos.

- Optimizar la reutilización de las formaleas o las camas (bancos) de pre-esforzado.
- Optimizar el espacio de almacenamiento para la fabricación, el curado y los patios de acopio de los elementos.

El curado de vapor se puede realizar a baja o alta presión. Los comités 516 y 517 del ACI, respectivamente, presentan informes detallados de cada uno de ellos.

Curado a baja presión

Se realiza a presión atmosférica y con temperaturas que no superan los 70 °C. La aplicación del vapor se hace normalmente en ambientes cerrados (Figura 12.13), evitando la pérdida de calor. Para el efecto, se hace a través de túneles donde los elementos de concreto se desplazan sobre una banda transportadora; también se pueden colocar lonas sobre el elemento y aplicarles el vapor a través de un sistema de tubería flexible.

La aplicación de calor se hace mediante un ciclo básico de 4 etapas, tal como se enseña en la Figura 12.14.

- Etapa preliminar o retraso inicial, antes de la aplicación de vapor. Comprende desde el momento del vaciado del elemento, hasta el fraguado inicial, o por lo menos 3 horas luego de vaciado el elemento, para permitir algún grado de endurecimiento. Normalmente comprende entre 3 y 5 horas y la temperatura es la del ambiente.
- Periodo de aumento de temperatura. El aumento de la temperatura del aire debe ser entre 10 °C y 20 °C por hora, dependiendo del tamaño y forma del elemento. Este periodo toma en promedio 2,5 horas.
- Periodo de mantenimiento de temperatura. El vapor se debe mantener a una temperatura cercana a los 60 °C, hasta que se haya desarrollado la resistencia del concreto. La resistencia no aumenta significativamente cuando se pasa de 60 °C a 70 °C. En cualquier caso, no se recomienda que la temperatura máxima exceda los 70 °C, pues además de resultar costosa, puede causar daños a

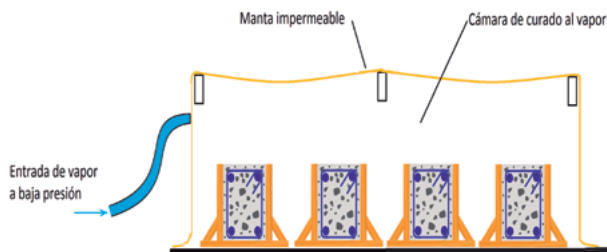


Figura 12.10. Curado del concreto con vapor a baja presión

▶ 12 Curado del concreto

la estructura. La temperatura máxima del vapor se debe determinar mediante ensayos o datos históricos de campo. Este periodo puede durar entre 6 y 12 horas.

- Periodo de enfriamiento. Es el periodo durante el cual se disminuye la temperatura. Puede durar alrededor de 2 horas. Se debe evitar altas velocidades de calentamiento y enfriamiento, previniendo daños causados por cambios bruscos de volumen. La temperatura en el ambiente cerrado circundante al concreto no debe aumentar o disminuir más que entre 22 °C y 33 °C, dependiendo del tamaño y forma del elemento en curado.

La optimización del desempeño del curado con vapor, es logrado mediante el desarrollo propio del ciclo o curva, acorde con las particularidades propias de cada planta, como el tipo de mezcla, tamaño y forma del elemento y condiciones de aplicación del vapor, entre otros. La curva de aplicación del vapor y elevación de la temperatura, debe corresponder a datos históricos tomados directamente de la planta.

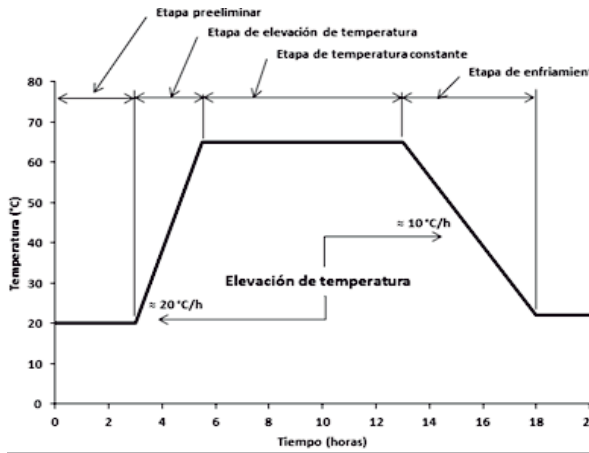


Figura 12.11. Ejemplo de ciclos de curado con vapor

Curado a alta presión

El curado a alta presión es realizado en cámaras de autoclave (Figura 12.12), que permiten incrementar la presión por encima de la atmosférica y elevar la temperatura, incluso, a más de 100 °C. Se emplea en la producción de elementos prefabricados relativamente pequeños, cuando se desea alguna de las siguientes propiedades:

- Alta resistencia inicial: lograr las resistencias previstas a 28 días en 24 horas.

- Alta durabilidad: mejorar la resistencia del concreto a los sulfatos y, en general, al ataque químico; hace menos permeable el elemento.
- Baja contracción: reducir la contracción por secado.

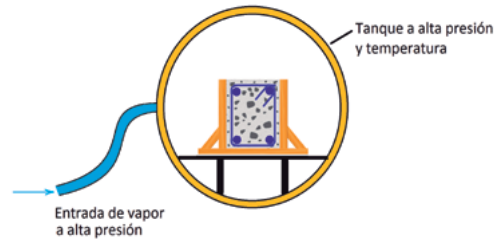


Figura 12.12. Curado del concreto en autoclave[†]

Este método es muy efectivo cuando se adiciona a la mezcla sílice finamente molida (finura al menos igual a la del cemento), dado que las reacciones químicas desarrolladas a altas temperaturas entre la sílice y el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, especialmente aquellos ricos en C_3S , favorecen la resistencia y la durabilidad de los elementos.

En la curva de aplicación de vapor, Neville (12.8) sostiene que los mejores resultados, al menos experimentalmente, se obtienen con temperaturas cercanas a los 177 °C, que corresponde a una presión de 0,8 MPa (8 kg/cm²), por encima de la atmosférica.

12.4.2 Curado interno

Los métodos de aplicación de agua sobre la superficie presentan algunas deficiencias, debido a que la humedad actúa únicamente sobre la periferia de la estructura donde se aplica la humedad, interviniendo solo una pequeña capa interna de poco espesor, y no en todo el volumen del concreto. De modo que, entre mayor sea el espesor del elemento, mayor será el volumen del concreto que queda sin curar.

*El ACI define el **curado interno** como "El proceso mediante el cual la hidratación del cemento es continua, gracias a la disponibilidad de agua interna diferente al agua de mezclado".*

Dentro de las investigaciones realizadas, se ha podido comprobar que el curado interno ayuda al concreto a desarrollar sus propiedades, toda vez que mejora la hidratación, reduce la fisuración temprana y la permeabilidad, el ingreso de cloruros y, en general, incrementa la resistencia y la durabilidad.

Los materiales aptos para hacer curado interno son los agregados livianos termo expandidos, algunos polímeros y, en algunos casos, otros materiales como la piedra pómez o el ladrillo triturado.

En el curado interno, los agregados livianos se saturan de agua previamente y luego se colocan en la mezcla, de modo que el agua libre se consume durante la hidratación del cemento, previniendo la auto-deseccación.

Un buen ejemplo de curado interno es cuando se usan agregados livianos termo-expandidos (LWA). Estos agregados también pueden ser usados para hacer concreto estructural liviano, como se estudió en el Capítulo 10. Cuando se usa como curado interno, el objetivo no necesariamente es bajar la densidad del concreto, por lo que se reemplaza solo entre el 5% y el 20% del volumen de los agregados finos y gruesos de densidad normal, por agregado liviano (Ver Figura 12.13).

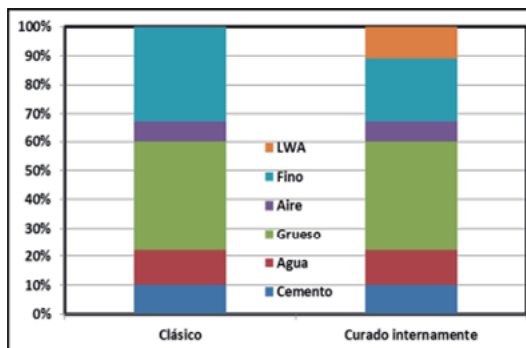


Figura 12.13. Proporción general de concreto con agregado liviano termo expandido para el curado interno

El curado interno se presenta a medida que el concreto se va secando y, el agua almacenada al interior del agregado liviano, migra hacia la pasta del cemento continuando el proceso de hidratación. Estos agregados permiten curar el concreto en partes donde difícilmente llegaría agua con tratamientos externos de curado. Con el curado interno se generan muchos otros beneficios, como el aumento

de la resistencia en obra, la disminución de la retracción por secado (contracción autógena), la reducción de la aparición de fisuras, y la disminución de la permeabilidad. Las aplicaciones de curado interno con agregados livianos son, especialmente, placas de concreto en vías y pisos industriales; losas estructurales; y concreto masivo, entre muchos otros.

12.4.3 Métodos para evitar la pérdida de humedad

Como se ha mencionado, la cantidad de agua de mezclado usada normalmente es mucho mayor a la requerida en la hidratación del cemento, de modo que si se puede retener la cantidad original, se dispondrá de agua suficiente para el curado.

Existen varios métodos y materiales que evitan la pérdida de humedad en la superficie del concreto, siendo los más utilizados la colocación de películas plásticas, papel impermeable, o la aplicación de compuestos de curado que forman membrana o sello sobre el concreto, inmediatamente después de colocado.

Película plástica

La película plástica (Figura 12.14) se encuentra estandarizada por la norma ASTM C171. Consiste en una hoja transparente, blanca o negra, de 0,10 mm de espesor y poco peso. La película blanca refleja de forma efectiva los rayos del sol, pero es la más costosa. Además, la transparente tiene poco efecto sobre la absorción de calor. La película negra no se recomienda para climas cálidos, a menos que sea para interiores. Sin embargo, en clima frío presenta ventajas por su mayor absorción de calor.



Figura 12.14. Película plástica usada para curado ✧

► 12 Curado del concreto

Cualquiera que sea la película utilizada, hay que tener cuidado que no se rompa o se formen agujeros, por donde se pueda salir el agua. Algunas películas plásticas vienen reforzadas con fibra de vidrio, proporcionándoles mayor resistencia y durabilidad y la posibilidad de ser reutilizadas.

La película plástica genera una superficie áspera, de aspecto motoso, por lo que no es aconsejable su uso cuando la apariencia del concreto es importante. Este inconveniente se puede solucionar haciendo inundaciones ocasionales por debajo de la película.

La colocación de la película debe hacerse sobre el concreto fresco lo más pronto posible, cubriendo todas las partes expuestas y teniendo cuidado de no dañarla, fijándola bien para que se mantenga en contacto con el concreto durante el tiempo de curado requerido. Sobre los elementos horizontales planos, como las losas de pavimentos y pisos, se debe dejar una pestaña, por lo menos, dos veces el espesor de la losa, para fijarla con algún elemento como franjas de arena o tierra o piezas de madera a lo largo de los bordes y uniones, evitando así que el agua se salga y el viento la levante.

Papel impermeable

Al igual que la película plástica, el papel impermeable está normalizado por la norma ASTM C171. Consta de dos hojas de papel kraft unidas entre sí mediante un aditivo o un cemento bituminoso, con fibras. La mayoría de papeles que se utilizan en el curado son tratados, buscando reducir el grado de expansión y de contracción a los ciclos de mojado y secado.

La norma también incluye, como requisito, el reflejo de la luz solar. Por esto, el lado que queda visible es de superficie blanca, para reflejar y reducir la absorción de calor.

La colocación del papel impermeable es similar a la película plástica. El material es reutilizable cuantas veces se quiera, siempre y cuando conserve su capacidad de retardar en forma efectiva la pérdida de humedad. En la detección de pequeños orificios, basta observar el papel a contraluz. Son fáciles de reparar pegando pedazos de papel con un cemento bituminoso o similar. Cuando se presenten dudas sobre las hojas, se pueden usar dobles.

Membranas de curado

La formación de las membranas de curado, son logradas mediante la aplicación de materiales líqui-

dos sobre la superficie del concreto. Están compuestos por ceras, parafinas, resinas naturales o sintéticas, polímeros, así como solventes altamente volátiles. Los requisitos de estos materiales se encuentran en la norma ASTM C309. Para lograr un cubrimiento completo, lo más práctico, es aplicar por lo menos dos capas, una perpendicular a la otra. Se pueden colocar a mano con una brocha ancha o con rodillo; también se puede utilizar aspersor (Figura 12.15).

Cuando sobre la superficie de concreto se vayan a aplicar capas adicionales de concreto, mortero, yeso, estucos plásticos o pintura, debe tenerse la precaución de elegir el tipo correcto de membrana curadora. Existen membranas curadoras compatibles con otras capas de materiales. Por el contrario, otras que inhiben completamente la adherencia. También hay productos desarrollados para permitir que sea removida más fácilmente la membrana una vez finalizado el curado, con el uso de limpiadores industriales, ablandadores de la membrana para removerla con el uso del equipo mecánico de limpieza y agua pura.



Figura 12.15. Aplicación de membrana de curado †

Para lograr la máxima eficiencia, las membranas curadoras son aplicadas después del acabado y tan pronto como haya desaparecido el agua libre sobre la superficie, de manera que el compuesto líquido no pueda ser absorbido por el concreto.

12.5 Métodos que ayudan al curado

Muchas veces, los procedimientos explicados no son suficientes para el cumplimiento de los objetivos perseguidos en el proceso de curado. Por ello, se han desarrollado métodos y materiales que ayudan de manera directa o indirecta al curado, como son las barreras de viento y sol, los retardantes de evaporación y los sellantes o selladores.

12.5.1 Barreras de viento y sol

Las barreras de viento y sol, o también conocidas como "polisombras", son telas o mallas tejidas en polietileno de alta densidad y estabilizadas con protección a los rayos UV, que garantizan su duración a la intemperie.

Se colocan en la zona circundante de la estructura protegiéndola, evitando que le dé el sol directamente, proporcionándole sombra; también mitiga la acción del viento cuando se coloca en los costados (Figura 12.16). De esta forma, la acción de las barreras de viento y sol reduce el impacto de los rayos ultravioleta, disminuye la temperatura y modera la velocidad del viento, creando micro climas más propicios para el desarrollo de las propiedades del concreto.



Figura 12.16. Barrera de sol sobre un pavimento de concreto realizado sobre un lleno con Livitek® (agregado termo expandido) †

Estos sistemas se recomiendan como medio de protección en estructuras con alta superficie expuesta, ubicadas en zonas con alta radiación solar, alta temperatura y mucho viento, circunstancias que favorecen la rápida evaporación del agua. Especial atención merecen los pavimentos en los que hay que evitar los túneles de viento, colocándole una sección de malla, a manera de tapa en uno de los extremos de la zona protegida, de modo que interrumpa el flujo de viento generado a lo largo de la vía.

12.5.2 Retardantes de evaporación

Son productos que, como su nombre lo sugiere, retardan la evaporación del agua de mezclado o previenen la pérdida de humedad en el concreto recién colocado, mediante la formación de una película continua y delgada.

Es recomendada en zonas con altas temperaturas, fuertes vientos y baja humedad relativa, específicamente para concretos con tasa de evaporación mayor a 1,0 kg/m²/h (Ver Diagrama de Menzel, Figura 12.3). Su aplicación se realiza con aspersor, bien sea manual o con el equipo de colocación.

12.5.3 Selladores o sellantes

Los selladores o sellantes, son productos que se aplican sobre la superficie del concreto recién colocado y terminado, para protegerlo de la entrada de líquidos, sales, aceites y otros fluidos, brindando mayor protección y durabilidad. Se colocan en losas de pisos internos, evitando la emisión de polvo y la absorción de grasas, además de darle brillo, hacer más fácil la limpieza y mejorar el aspecto del concreto. Estas propiedades se logran gracias al sello formado en la superficie, evitando la evaporación del agua de mezclado, ayudando al curado, no siendo esta su función principal.

12.6 Otros métodos de curado

Existen otros muchos métodos de curado que, aunque no son muy usados en Colombia, están disponibles desde hace varios años en países como Estados Unidos y, en general, en Europa. Hay métodos que aplican electricidad, aceite caliente, micro-ondas y rayos infrarrojos, empleados principalmente en climas fríos en la producción de prefabricados.

Los métodos eléctricos pueden usar el mismo concreto como medio conductor, o al acero como elemento calentador, o alambres especiales como calefacción, o mantas eléctricas, o formaletas calentadas eléctricamente. El aceite caliente es utilizado a manera de elemento circulante en formaletas metálicas, que a su vez, calientan al concreto.

Cuando se emplean rayos infrarrojos normalmente se hace bajo una cubierta en la formaleta metálica; estos y los métodos a base de micro-ondas, son limitados a la realización de un curado acelerado.

12.7 Referencias y bibliografía recomendada

12.1. AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Standard Practice for Curing Concrete. Comité ACI 308R, Detroit, Yona D. Kahn, 2001.

12.2. ASOCIACIÓN DE INGENIERÍA SÍSMICA. Reglamento Colombiano de Construcciones Sismo Resistente. Bogotá, AIS, 2011.

12.3. CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. Concrete Technology and Construction, General Principles, London, C&CA, 1984.

12.4. INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO. Notas Técnicas No. 5. Práctica Recomendada para el curado del Concreto. Medellín, ICPC, 1982.

12.5. INSTITUTO CHILENO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN. Manual del Hormigón. Santiago de Chile, 1984.

12.6. INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL

CONCRETO. Curado del Concreto, México D.F., Ed. Abeja, 1983.

12.7. MATA LLANA, R. Fundamentos de Concreto Aplicados a la Construcción. Bogotá, ICPC, 2007.

12.8. NEVILLE, A.M. Tecnología del Concreto. México, IMCYC, 1999.

12.9. PÓRTLAND CEMENT ASSOCIATION. Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Illinois, PCA, 2004.

12.10. TROXEL, DAVIS y KELLY. Composition and Properties of Concrete. California, Mc Graw-Hill, 1986.



El control de calidad del concreto involucra verificar los requisitos en estado fresco como endurecido, incluida su durabilidad.

13

Control de calidad del concreto

En general, las especificaciones son una descripción escrita del proyecto, complementada con los planos, que son su representación gráfica y, en su conjunto, son los documentos contractuales. Las especificaciones son redactadas por profesionales del diseño, que incluyen ingenieros y arquitectos especializados en el tema.

En el caso del concreto, se establecen requisitos tanto en estado fresco como endurecido, que involucran la implementación de un sistema de control de calidad, con la adopción de una serie de pruebas, el seguimiento de un procedimiento, y el análisis estadístico de los resultados, lo que implica necesariamente, la selección de pruebas de aceptación y rechazo. Todo ello, con el fin de asegurar que finalmente el material cumple las especificaciones.

Cualquiera que sea el caso, se deben identificar los requisitos especificados y tomar las medidas para cumplirlos. Por lo general, se puede identificar el requisito más estricto, que normalmente termina siendo el más costoso en la producción de una mezcla de concreto.

Este capítulo hace un repaso integral de las diferentes actividades que componen el control de calidad rutinario del concreto en obra, a la luz de la normativa y de las prácticas usadas en Colombia.

13.1 Definición de control de calidad

Como se ha estudiado, el concreto es un material elaborado, que comprende los procesos de obtención de los materiales componentes, el diseño y la

elaboración (medición y mezcla), y el transporte, el manejo, la colocación, la consolidación, el terminado y el curado. De modo que el control de calidad del concreto se basa en la verificación del cumplimiento de las características especificadas de las materias primas, la supervisión de las operaciones completas de medición y mezcla, y el control de los procesos siguientes a la elaboración del concreto. El control de calidad se complementa con la verificación de las propiedades especificadas del concreto en sus estados fundamentales, como son el fresco y el endurecido.

El control de calidad se puede definir como el conjunto de acciones y decisiones que se toman con el fin de: Hacer cumplir unas especificaciones previamente establecidas, verificar que se están cumpliendo, o comprobar que han sido cumplidas.

13.2 Normativa aplicable

13.2.1 Base de la normativa colombiana

El cumplimiento de las especificaciones está dado mediante pruebas estandarizadas, con el fin de que los resultados obtenidos en diferentes laboratorios puedan ser comparables. En América se ha generalizado el empleo de pruebas estandarizadas. En los Estados Unidos, específicamente, los de la *American Society for Testing and Materials* - ASTM, los de la *American Association of State Highway and Transportation Officials*

– AASHTO, y algunas prácticas recomendadas y códigos del *American Concrete Institute* – ACI, que tienen carácter internacional.

Algunos diseños pueden indicar que los materiales cumplan normas de otros países, o de organizaciones internacionales como la ISO (*International Standard Organization*), que pueden ser más exigentes o complementar las normas más usuales en el medio, y que deberán cumplirse al ser parte de la especificación.

La ASTM produce normas, procedimientos de ensayo y especificaciones en cementos, agregados para concreto, materiales cementantes, concreto y aditivos. Lo referente a cemento lo maneja el Comité C 1; mientras que lo que compete a concreto, agregados y aditivos, corresponden al Comité C 9. La ASTM revisa y actualiza las normas y especificaciones máximo cada 5 años.

Es importante que, tanto los laboratorios como los contratistas, y en general los involucrados en el control de calidad, aseguren el empleo de la versión aplicable de la norma, para evitar equívocos y malos entendidos en los resultados de una norma específica.

13.2.2 Normativa colombiana

En Colombia, como se ha mencionado, priman las Normas Técnicas Colombianas (NTC), que para el caso del concreto y sus materiales componentes, la gran mayoría son homologadas o tomadas de las normas y procedimientos de ensayo de la ASTM. No obstante, las NTC per se no son obligatorias, a menos que sean expresamente enunciadas por una ley de la república, o hagan parte de un decreto, resolución o reglamento técnico emitido por un ente oficial. O bien que sea parte de un contrato privado.

La normativa para concreto aplicable al medio colombiano depende del área donde se use. Las principales normas que actualmente rigen en el país son: el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR), la Norma del Instituto Nacional de Vías – INVÍAS; el Código Colombiano de Puentes (CCP) y las Normas y Resoluciones emitidas por entidades oficiales locales. Todas acogen en buena parte los procedimientos y normas de las NTC, haciéndolas así de obligatorio cumplimiento.

Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - NSR

La NSR fue actualizada en el 2010 y es la versión que, al momento de escribir este documento, se encuentra vigente. Se conoce como la NSR-10, constituyéndose, tal vez, en el referente técnico más

importante del país.

En lo referente al concreto, un gran porcentaje está basada en el Código ACI 318 de 2011 *Building Code Requirements for Structural Concrete*. La NSR es de uso obligatorio a nivel nacional en las edificaciones, por ser emitida como decreto reglamentario de la Ley 400 de 1997. Específicamente, el Título C, se refiere a los materiales componentes del concreto, relaciona los requisitos que se deben cumplir por durabilidad, y establece las exigencias en la calidad del concreto propiamente dicha, el mezclado y la colocación.

Su principal aplicación está en las edificaciones, aunque también es usual que se cite como requisito en obras de infraestructura y otras construcciones.

Código Colombiano de Puentes - CCP

El CCP, emitido por el Ministerio del Transporte en el año 2014 como reemplazo de la Norma del 2005, tiene como objeto el diseño, evaluación y rehabilitación de puentes viales, con énfasis en el diseño sísmico. La Sección 5, trata lo referente al concreto, tanto de peso normal como el liviano estructural. Las especificaciones de los materiales los refiere a la norma AASHTO *Specifications for Transportation, Materials and Methods of Sampling and Testing*, que generalmente los remite a las normas ASTM respectivas.

El CCP prescribe al concreto por sus características, especificando contenidos mínimos de cemento, relación a/mc, contenido de aire, agregados y resistencia a la compresión a 28 días de edad.

Norma del Instituto Nacional de Vías - INVÍAS

La norma INVÍAS es una especificación general de construcción de carreteras y normas de ensayo para materiales. Su última versión data del año 2013, adoptada mediante resolución del Ministerio de Transporte. El Capítulo 5 detalla la construcción de pavimentos de concreto hidráulico (losas y adoquines), donde se establecen los requisitos para el concreto, los materiales y demás aspectos relacionados.

Otras normas

Otras normas son, por ejemplo, las emitidas por entidades oficiales locales, como el caso del Instituto de Desarrollo Urbano – IDU de la ciudad de Bogotá, cuya reglamentación técnica aplica para la contratación de obras públicas con esta entidad. Algunas multinacionales también suelen tener especificaciones para ser usadas en la construcción de sus sedes.

13.3 Práctica del control de calidad

La práctica del control de calidad del concreto se realiza mediante pruebas, para demostrar que las propiedades para las cuales fue concebida, diseñada y especificada la mezcla, tanto en estado fresco como endurecido, finalmente se cumplen.

Lo anterior hace imprescindible que los ensayos se realicen con una muestra representativa del concreto en prueba, para lo cual se debe seguir el procedimiento dado en la NTC 454, Concreto fresco – Toma de muestras (ASTM C172).

Otros aspectos importantes al hacer la práctica en el control de calidad del concreto, lo constituyen el laboratorio y el personal que realiza las pruebas. La ASTM C94, Standard Specification for Ready Mixed Concrete, establece que los ensayos que determinan si el concreto en obra cumple con las especificaciones, deben ser realizadas por un técnico certificado por el ACI como Grado 1 o su equivalente, certificaciones disponibles en Colombia. Por su parte, el laboratorio debe cumplir con la Norma ASTM C1077 *Standard Practice for Agencies Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Testing Agency Evaluation*.

En lo que corresponde a la NTC 3318, sobre elaboración del concreto, se indica que las personas encargadas de la toma de muestras y de análisis de los resultados de ensayos, deben tener conocimiento y evidenciar competencia en la realización de estas labores. En caso del laboratorio de ensayo, establece que debe estar acreditado por la Organización Nacional de Acreditación de Colombia – ONAC, o cumplir con las especificaciones de la ASTM 1077.

13.3.1 Control al concreto fresco

El control al concreto en estado fresco se hace, en esencia, para:

- Verificar que la trabajabilidad sea la especificada.
- Corroborar que es homogénea, que no presente segregación ni exudación, y que es cohesiva.
- Comprobar la uniformidad del producto, es

decir, que la producción entre las diferentes tandas de producción (léase “bachadas”) tiene en esencia las mismas propiedades.

- Verificar el contenido de aire especificado.
- Determinar que la temperatura del concreto es la adecuada.

Las pruebas empleadas para estos fines son las de densidad (peso unitario), contenido de aire, manejabilidad y temperatura, cuyos procedimientos fueron descritos en el Capítulo 7, realizados con una muestra representativa del concreto evaluado, tomada acorde con la NTC 454.

Sin duda, el ensayo más usado para medir la propiedad en estado fresco es el de asentamiento o del cono de Abrams (Figura 13.1), explicado en el Capítulo 7. Con él se pueden determinar las variaciones tanto en las características como en la dosificación de los materiales componentes, puesto que los cambios sufridos en una mezcla pueden ser debidos a la cantidad de agua, contenido de aire, cantidad y funcionamiento de los aditivos, forma y textura de los agregados, variación en la granulometría, o características del cemento.



Figura 13.1. Asentamiento

La NTC 3318 establece que, a menos que las tolerancias sean incluidas en las especificaciones del proyecto, se deben aplicar las siguientes:

Cuando sea requisito un “máximo”:

- Asentamiento ≤ 75 mm.
 - Tolerancia por defecto: 40 mm.
 - Tolerancia por exceso: 0 mm.
- Asentamiento > 75 mm.
 - Tolerancia por defecto: 65 mm.
 - Tolerancia por exceso: 0 mm.

Aclara que esta opción es empleada solo si se permite una adición de agua en la obra, y siempre que la adición no incremente la relación a/mc, por encima del máximo permitido por las especificaciones.

Cuando no se prescriban como requisito un “máximo”:

- Asentamiento ≤ 50 mm: tolerancia de ± 15 mm.
- Asentamiento entre 50 mm y 100 mm: tolerancia de ± 25 mm.
- Asentamiento mayor a 100 mm: tolerancia de ± 40 mm.

En caso de especificarse un ensayo diferente al asentamiento, los documentos deben indicar el nombre preciso y la norma sobre la cual se debe realizar su procedimiento, así como las tolerancias y criterios de aceptación de la mezcla.

13.3.2 Control al concreto endurecido

Entre otras pruebas desarrolladas en la evaluación de las características del concreto endurecido, se encuentran: la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la densidad, la permeabilidad, el análisis petrográfico, la microscopía, los cambios de longitud y de volumen, la carbonatación, el contenido de cemento, el contenido de aditivos, la penetración de cloruros, la permeabilidad, las pruebas no destructivas y las pruebas de carga; algunas de ellas fueron descritas en el capítulo de Propiedades del Concreto, y otras que serán explicadas a continuación.

En Colombia, como en buena parte del mundo, la calidad del concreto endurecido se evalúa por medio de la resistencia a la compresión, toda vez que representa una de sus características más importantes. Además, porque indirectamente puede suministrar información de otras propiedades. Así mismo, en determinadas estructuras, como pisos y pavimentos de concreto, generalmente se especifica el ensayo de la resistencia a la flexión, como medio para evaluar la calidad del concreto.

Control mediante la resistencia a la compresión

Edades de control

Como se mencionó, las pruebas de la resistencia a la compresión se pueden realizar a diferentes edades (1, 3, 7, 14, 28 y, en casos especiales, a 56, 90, 120 e incluso a 360 días), mediante probetas cilíndricas. Para el caso de pavimentos, se suelen usar prismas de concreto (Figura 13.2).

Las especificaciones deben indicar las edades en las que se debe controlar la resistencia. Para la mayoría de las mezclas usualmente se establece como mínimo a 7 y 28 días, y por ello lo ideal es que el productor conozca la relación entre estas dos edades, de modo que, conociendo el desarrollo a 7 días, se pueda prever el cumplimiento de la resistencia especificada ($f'c$) a los 28 días.

Ocasionalmente, las especificaciones requieren un concreto de resistencia inicial alta para algún uso especial, como el caso de los concretos pretensados, en los que a 7 días se puede requerir la esperada para los 28 días. También es factible requerir la medición a 56 días en lugar de 28 días, como es el caso de concretos de altas resistencia, o aquellos elaborados con materiales cementantes suplementarios que muestren su desarrollo.

En el caso de edificación, según la NSR-10, la edad máxima de aceptación de la resistencia a la compresión es 28 días, pudiéndose especificar también por el diseñador la resistencia a edades menores. Pero en ningún caso permite la aceptación a edades mayores de 28 días. Sin embargo, esta limitación de edades altas no aplica en a obras de infraestructura, en donde la edad de especificación de la resistencia a la compresión del concreto, es la suministrada por el



Figura 13.2. Elaboración de vigas de concreto para medir módulo de rotura [§]

Tipos de control

Las probetas de concreto pueden ser elaboradas en la planta de concreto y en la obra, y recibir diferentes clases de manejo y curado, según sea el tipo de control de interés. En general, se identifican los siguientes tres tipos de control.

Control de la calidad de producción: el productor de concreto elabora y ensaya las probetas bajo condiciones estándar de laboratorio. Por medio de estos ensayos, el productor optimiza sus mezclas y lleva un registro de la resistencia potencial del concreto elaborado y despachado.

Control de la calidad de recepción: lo realiza el contratista (quien recibe y utiliza el concreto), elaborando probetas en el momento de la descarga de la mezcladora, curándolas y ensayándolas bajo condiciones estándar de laboratorio, para llevar un registro y comprobar la resistencia potencial del concreto recibido. Sus resultados se usan en la comparación con los realizados por el productor.

Control del desarrollo de la resistencia en la estructura: las condiciones a que está expuesto el concreto colocado en la estructura son diferentes a las que tendrá en el laboratorio. Ello ocurre porque los procesos de manejo, colocación, compactación, terminado y curado entre las probetas y el concreto en la obra son diferentes. De ahí que, el contratista puede elaborar probetas, denominadas “testigo”, dejarlas al lado de la estructura y someterlas a sus mismas condiciones de exposición. De esta manera, al fallarlas, se logran datos más reales acerca del desarrollo de la resistencia de la estructura. A estos ensayos se les denomina ensayos de información, que son muy útiles en la determinación del tiempo para el desencofrado o poner al servicio la estructura.

Causas de variación en los ensayos de resistencia

Durante la realización del ensayo de resistencia del concreto, se pueden presentar muchas variables que influyen en los resultados o en su interpretación. En general, las variaciones pueden tener dos orígenes: variaciones reales y variaciones aparentes.

Variaciones reales son las debidas a los materiales que componen el concreto y por los procesos de elaboración (dosificación y mezcla). Es muy fre-

cuente encontrar que hay cambios en la relación a/mc , debido a un deficiente control del agua, a una variación en la humedad de los agregados, o por agregarle agua a la mezcla en la obra.

Asimismo, se pueden encontrar variaciones en los requerimientos de agua debido al cambio en algunas propiedades de los agregados (procedencia, granulometría, absorción o a la forma de la partícula), en las propiedades del cemento (finura, materiales cementantes suplementarios, tipo, marca), de los aditivos, contenido de aire, o el tiempo de entrega y la temperatura ambiente. Igualmente, influyen las variaciones en proporciones de los materiales componentes.

Otros aspectos son las variaciones en el tiempo y tipo de equipo de mezclado, el transporte, la colocación y la compactación, así como las variaciones en la temperatura del concreto y en el curado.

Variaciones aparentes son las debidas a la imprecisión propia de los ensayos empleados al evaluar la resistencia. Es muy común emplear procedimientos incorrectos tratando de obtener muestras representativas, empleo de moldes defectuosos, así como la aplicación indebida de los procedimientos de elaboración, manejo y curado de las probetas. También influye la versión de la norma usada, debiéndose emplear la que efectivamente aplique, según la especificación del proyecto.

Del mismo modo, las deficiencias en el procedimiento de ensayo propiamente dicho, como ocurre por el empleo de probetas defectuosas. El uso de equipos descalibrados puede arrojar resultados uniformes en las pruebas, pero no necesariamente significa que los resultados obtenidos sean correctos. O la misma interpretación de resultados realizados por personal no idóneo.

El Comité ACI 214 - 77 presenta un completo resumen de las variables que influyen en las pruebas de resistencia a la compresión del concreto.

Análisis estadístico de resultados de resistencia a la compresión

El aseguramiento de la calidad del concreto se basa en el tratamiento y análisis en conjunto de los registros de los valores en la resistencia, de tal forma que, se establezca el comportamiento general de la suma de las variables intervinientes: materiales, elaboración, manejo, muestreo, imprecisiones de ensayo, entre otras. Esto significa que, para su interpretación, se deben aplicar las técnicas de la estadística. Los siguientes son los parámetros estadísticos generales usados el control de calidad del concreto.

a). Promedio aritmético (\bar{X})

El promedio aritmético expresa la resistencia promedio de todas las pruebas individuales. Se calcula mediante la Ecuación 13.1.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}{n} \quad \text{Ecuación 13.1}$$

Donde:

\bar{X} : promedio aritmético.

$X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n$: resultados de la resistencia en las pruebas individuales.

n : Número total de pruebas efectuadas.

b). Prueba

La prueba, es el valor de resistencia de una probeta a una determinada edad de un mismo tipo de concreto.

c). Ensayo

El ensayo se define como el valor resultante del promedio de, al menos, dos probetas a una determinada edad en un mismo tipo de concreto.

La NSR - 10, precisa que un ensayo de resistencia debe ser el promedio de las resistencias de por lo menos dos probetas de 150 por 300 mm; o por lo menos tres probetas de 100 por 200 mm, preparadas de la misma muestra de concreto y ensayadas a 28 días, o a la edad de ensayo establecida por el calculista ($f'c$).

d). Desviación estándar (σ)

Está definida mediante la Ecuación 13.2.

$$\sigma = \{(\sum(Xi - \bar{X})^2 / (n-1))\}^{0.5} \quad \text{Ecuación 13.2}$$

Dónde:

σ desviación estándar.

Xi : resultados individuales de las pruebas.

\bar{X} : promedio aritmético de las pruebas.

n : número de pruebas.

La desviación estándar es la medida de la dispersión o variabilidad de los datos con respecto a su media aritmética. Cuando σ es grande, indica que existe mucha variación, mientras que si σ es pequeño, indica que los valores de resistencia están muy cerca del promedio aritmético.

Teóricamente, el valor por el que debería dividirse sería n , si se tratara de un número ilimitado de pruebas. No obstante, el número de pruebas es limitado y por tanto se debe emplear $(n - 1)$. Esto se debe a que $(n - 1)$ aumenta el valor de σ y tiende a compensar la inseguridad proveniente de la limitación numérica de la muestra.

e). Coeficiente de variación (V)

El coeficiente de variación se define como la relación que existe entre la desviación estándar (\bar{X}) y el promedio aritmético (σ), expresado en porcentaje (Ecuación 13.3).

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} * 100 \quad \text{Ecuación 13.3}$$

El coeficiente de variación es un parámetro que da buena idea sobre la calidad del control ejercido en la producción del concreto.

En la Tablas 13.1 y 13.2, se indican los grados de control dados por el ACI 214-02, para $f'c < 34,5$ MPa y para $f'c > 34,5$ MPa, respectivamente, con relación a la variación total y a la variación dentro de la prueba.

Tabla 13.1. Estándares para el grado de control sobre el concreto para $f'c < 34,5$ MPa (13.1)

Variación total					
Clase de operación	Desviación estándar para diferentes controles, MPa				
	Excelente	Muy buena	Buena	Aceptable	Pobre
Pruebas de control en la obra	< 2,8	2,8 a 3,4	3,4 a 4,1	4,1 a 4,8	> 4,8
Mezclas de prueba en laboratorio	< 1,4	1,4 a 1,7	1,7 a 2,1	2,1 a 2,4	> 2,4
Variación dentro de las pruebas					
Clase de operación	Coeficiente de variación para diferentes controles, %				
	Excelente	Muy buena	Buena	Aceptable	Pobre
Pruebas de control en la obra	< 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	> 6
Mezclas de prueba en laboratorio	< 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	> 5

Tabla 13.2. Estándares para el grado de control sobre el concreto para $f'c > 34,5$ MPa (13.1)

Variación total					
Clase de operación	Desviación estándar para diferentes controles, MPa				
	Excelente	Muy buena	Buena	Aceptable	Pobre
Pruebas de control en la obra	< 7,0	7,0 a 9,0	9,0 a 11,0	11,0 a 14,0	> 14,0
Mezclas de prueba en laboratorio	< 3,5	3,5 a 4,5	4,5 a 5,5	5,5 a 7,0	> 7,0
Variación dentro de las pruebas					
Clase de operación	Coeficiente de variación para diferentes controles, %				
	Excelente	Muy buena	Buena	Aceptable	Pobre
Pruebas de control en la obra	< 3	3 a 4	4 a 5	5 a 6	> 6
Mezclas de prueba en laboratorio	< 2	2 a 3	3 a 4	4 a 5	> 5

f). Rango o intervalo (R)

Se denomina rango a la diferencia entre el menor y el mayor valor de un grupo de números. En consecuencia, el rango del ensayo es la diferencia entre el valor más alto y el más bajo de la resistencia de un grupo de cilindros, que se promedian para determinar un ensayo. Este factor es importante en el cálculo de la desviación estándar inherente a la prueba.

g). Frecuencia

La frecuencia es el número de veces que se repite un mismo valor en las pruebas de resistencia.

h). Variación dentro de la prueba

Si de una mezcla de concreto se realiza un suficiente número de pruebas, se puede detectar la variación propia dentro del ensayo. En teoría, si la mezcla es homogénea, no se deberían presentar variaciones en sus adentros. Cuando se tienen pocas pruebas de una sola mezcla, se utilizan las Ecuaciones

13.4 y 13.5, en el cálculo de la desviación estándar y el coeficiente de variación, respectivamente.

$$\sigma = K_f \bar{R} \quad \text{Ecuación 13.4}$$

$$V_f = \left(\frac{\sigma_f}{\bar{X}} \right) * 100 \quad \text{Ecuación 13.5}$$

Donde:

K_f : constante que depende del número de cilindros en cada grupo (Tabla 13.3).

\bar{R} : rango promedio dentro de grupos de cilindros compañeros.

σ_f : desviación estándar dentro de la prueba.

\bar{X} : resistencia promedio.

V_f : coeficiente de variación dentro de la prueba.

Tabla 13.3. Constantes para calcular la desviación estándar dentro de la prueba (13.1)

Número de cilindros	K_1
2	0,8865
3	0,5907
4	0,4857
5	0,4299
6	0,3946
7	0,3698
8	0,3512
9	0,3367
10	0,3249

i). Distribución normal de frecuencias

Cuando se dispone de una serie mayor o igual a 30 resultados de ensayos de resistencia, se puede elaborar una distribución normal. En un plano cartesiano, en el eje de las ordenadas se coloca la frecuencia con que se presentan los resultados de los ensayos de resistencia, y en las abscisas los valores de resistencia, obteniéndose una curva como la mostrada en la Figura 13.3. Por la facilidad de manejo y cálculo que representa una distribución normal, resulta práctico aplicar los principios de la estadística al control de calidad del concreto.

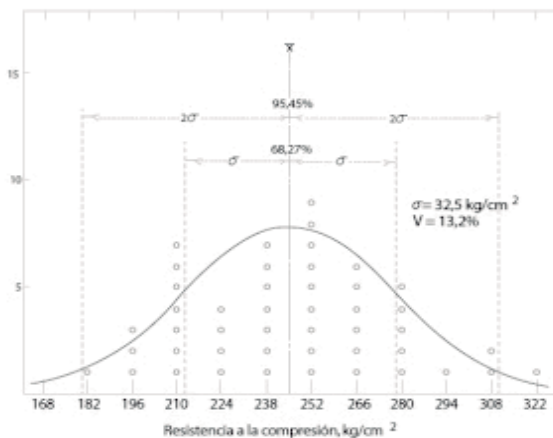


Figura 13.3. Ejemplo de una curva característica de distribución normal de frecuencias aplicada a pruebas de resistencia a la compresión (13.1)

Algunas de las propiedades de la curva de distribución normal de frecuencias son las siguientes:

- Es simétrica en torno a \bar{X}
- Si a \bar{X} se resta el valor de σ , se obtiene un punto de inflexión p1; y si se le suma se tiene otro punto de inflexión p2.
- El grado de esbeltez de la curva indica el grado de control ejercido sobre el concreto. En la medida que aumenta el grado de control, la curva se torna esbelta, toda vez que los valores de resistencia tienden agruparse alrededor de \bar{X} ; por el contrario, cuando el grado de control es deficiente, las variaciones en la resistencia son grandes, y la curva tiende a formarse baja y tendida. En la Figura 13.4, se muestra un ejemplo para tres diferentes grados de control.

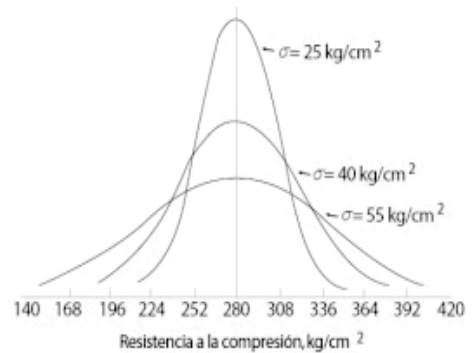


Figura 13.4. Ejemplo de curvas de distribución normal de frecuencia para diferentes grados de control (13.1)

Evaluación para aceptación del concreto Frecuencia de los ensayos

La NSR - 10 establece que la frecuencia para los ensayos de resistencia de cada clase de concreto, debe ser mínimo: 1 vez por día; 1 vez por cada 40 m³ de concreto; 1 vez por cada 200 m² de área de losas o de muros; y 1 muestra por cada 50 tandas de mezclado de cada clase de concreto.

Además, estipula que si el volumen de con-

creto no da para tomar 5 muestras, se deben tomar muestras de por lo menos 5 mezclas tomadas al azar, o en cada mezcla si se usan menos de 5. Ahora, si el volumen de concreto es menor a 10 m³, no se requieren ensayos de resistencia, cuando existe suficiente evidencia de que la resistencia es satisfactoria para ser aprobada por el supervisor técnico.

Criterios de aceptación del concreto

La NSR - 10 establece los siguientes criterios, determinando si el nivel de resistencia para una clase determinada de concreto, se considera satisfactorio, evaluado con cilindros de 100 por 200 mm o de 150 por 300 mm, para probetas curadas en el laboratorio en forma estándar o probetas curadas en campo.

- a) Probetas curadas en el laboratorio de forma estándar

El nivel de resistencia en cada clase de concreto se considera satisfactorio si:

- Cada promedio aritmético de tres ensayos de resistencia consecutivos de pruebas de resistencia, es igual o superior a $f'c$.
- Ningún resultado del ensayo de resistencia es menor que $f'c$ por más de 3,5 MPa, cuando $f'c$ es 35 MPa o menor; o por más de 0,10 $f'c$, cuando $f'c$ es mayor a 35 MPa.

En el evento que no se cumpla cualquiera de los dos requisitos mencionados, se deben tomar de inmediato las medidas necesarias aumentando el promedio de los resultados en los siguientes ensayos de resistencia. Si no se cumple con el criterio (ii), se deben investigar los resultados de los ensayos, tal como se explica más adelante.

Es de recordar, que el término ensayo se refiere al promedio de las resistencias de por menos dos probetas de 150 por 300 mm, o de tres probetas de 100 por 200 mm, preparadas de la misma muestra de concreto y ensayadas a 28 días, o a la edad de ensayo establecida por la determinación de $f'c$.

- b) Ensayo de muestras curadas bajo condiciones de campo (cilindros testigo).

Como se mencionó anteriormente, los cilindros curados bajo condiciones de campo (testigos) permiten comprobar las bondades del curado y la protección del concreto en la estructura. En este sentido, la NSR - 10 establece que el supervisor técnico

puede exigir el ensayo de resistencia de cilindros para la determinación de tales características, caso en el cual se debe proceder de acuerdo con el procedimiento relacionado en la NTC 550, moldearse al mismo tiempo y tomarse del mismo material usado para elaborar los cilindros curados en el laboratorio.

La NSR - 10 establece que los procedimientos de protección y curado del concreto en la estructura, se deben mejorar cuando la resistencia de los cilindros curados en el campo, ensayados a la misma edad para determinar $f'c$, sea menor del 85% de la resistencia de cilindros compañeros curados en el laboratorio. No obstante, esta condición se puede obviar, si la resistencia de los cilindros excede a $f'c$ en más de 3.5 MPa.

Ejemplo:

Aplicar los conceptos estudiados y los criterios establecidos por la NSR - 10 para un registro de obra, para los concretos de 21 MPa, que se indican en la Tabla 13.4. (Página siguiente)

Dado que se cuenta con suficiente número de pruebas, se pueden aplicar algunos de los conceptos estadísticos estudiados.

Promedio aritmético: $\bar{x} = 22,495$ MPa.
Desviación estándar: $\sigma = 1,868$ MPa.
Coeficiente de variación: $V = 8,3\%$.

Resistencia promedio requerida.

En el evento, de que la mezcla haya sido diseñada mediante el concepto de resistencia promedio requerida ($f'cr$), se debió emplear el mayor valor de las Ecuaciones 13.6 y 13.7:

$$\begin{aligned} f'cr &= f'c + 1,34 * \sigma \\ &= 21,0 + 1,34 * (1,868) \\ &= 23,5 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Ecuación 13.6

$$\begin{aligned} f'cr &= f'c + 2,33 * \sigma - 35 \\ &= 21,0 + 2,33 * (1,868) - 35 \\ &= 21,8 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Ecuación 13.7

Es decir, 23,5 MPa

Tabla 13.4. Ejemplo de aplicación

Nº del ensayo	Resultado de las pruebas a 28 días, MPa	Resultado del ensayo, MPa	Promedio aritmético de tres resultados de ensayos consecutivos, MPa	Rango del ensayo, MPa
1	22,0 21,6	21,8		0,4
2	25,2 25,0	25,1		0,2
3	23,8 24,6	24,2	23,7	0,8
4	24,0 22,0	23,0	24,1	2,0
5	19,0 21,0	20,0	22,4	2,0
6	19,0 20,9	20,0	21,0	1,9
7	20,3 22,0	21,2	20,4	1,7
8	24,0 23,2	23,6	21,6	0,8
9	25,0 24,2	24,6	23,1	0,8
10	24,0 25,2	24,6	24,3	1,2
11	23,6 23,0	23,3	24,2	0,6
12	22,5 24,1	23,3	23,7	1,6
13	24,5 23,5	24,0	24,0	1,0
14	24,0 24,0	24,0	23,8	0,0
15	17,0 20,0	18,5	22,2	3,0
16	23,6 21,3	22,4	21,6	2,3
17	25,0 24,2	24,6	21,8	0,8
18	21,8 21,4	21,6	22,9	0,2
19	21,6 23,8	22,7	23,0	2,2
20	18,8 19,2	19,0	21,1	0,4
21	23,7 23,1	23,4	21,7	0,6
22	22,0 21,4	21,7	21,4	0,6
23	18,9 20,4	19,6	21,6	1,5

Tabla 13.4. (Continuación)

Nº del ensayo	Resultado de las pruebas a 28 días, MPa	Resultado del ensayo, MPa	Promedio aritmético de tres resultados de ensayos consecutivos, MPa	Rango del ensayo, MPa
24	22,8 22,0	22,4	21,2	0,8
25	20,0 17,5	18,8	20,3	2,5
26	24,5 23,4	24,0	21,7	1,1
27	21,4 20,8	21,1	21,3	0,6
28	20,0 19,2	19,6	21,6	0,8
29	21,5 19,8	20,6	20,4	1,7
30	22,4 21,6	22,0	20,7	0,8
31	22,5 21,5	22,0	21,5	1,0
32	24,4 24,0	24,2	22,7	0,4
33	24,4 23,2	23,8	23,3	1,2
34	23,5 22,9	23,2	23,7	0,6
35	23,1 24,0	23,6	23,5	0,9
36	25,8 25,5	25,6	24,1	0,3
37	23,5 23,0	23,2	24,4	0,5
38	24,0 23,0	23,5	24,1	1,0
39	23,9 23,1	23,5	23,4	0,8

De otro lado, el coeficiente de variación (V) de 8%, de acuerdo con la Tabla 13.1, indica que el grado de control ejercido durante la producción fue pobre, aunque la desviación estándar (1,868 MPa) indica que la variación total fue buena.

Por último, aplicando los criterios de la NSR - 10, para aceptación del concreto, se tiene que varios de los promedios aritméticos de tres resultados consecutivos en ensayos de resistencia, registran un valor por debajo del valor nominal especificado (21,0 MPa), por lo que fue necesario tomar medi-

das para aumentar el promedio de los siguientes ensayos. No obstante, se cumple con el segundo criterio establecido (ii), pues ningún resultado individual de prueba es inferior a $f'c - 3,5$ MPa ($21 - 3,5 = 17,5$ MPa), razón por la cual no habría que investigar los resultados bajos en los ensayos de resistencia.

Investigación de los resultados bajos en los ensayos de resistencia

a) Toma de núcleos

La NSR - 10 establece que si cualquier resultado en prueba de cilindros curados en el laboratorio no cumple con el criterio (ii), o si los ensayos de cilindros curados en la obra indican deficiencia de protección y de curado, se deben tomar las medidas de aseguramiento para que ni la capacidad de carga ni la durabilidad de la estructura se vean comprometidas. Generalmente, la medida recomendada y adoptada consiste en mejorar el proceso de curado, aunque esto no necesariamente es suficiente.

Si se comprueba que el concreto es de baja resistencia, y los cálculos indican que la capacidad de soportar cargas se redujo significativamente, hay que permitir la extracción de núcleos de la zona en duda, de acuerdo con la NTC 3658 (ASTM C42M). La NSR - 10 establece que se deben tomar tres núcleos por cada resultado del ensayo de resistencia que sea menor a los valores señalados en el criterio (ii) (Figura 13.5).



Figura 13.5. Toma de núcleos de concreto ✧

La NSR - 10 especifica que los núcleos extraídos deben preservar la humedad, colocándolos dentro de recipientes o bolsas herméticas, transportarlos al laboratorio y ensayarlos, no antes de 48 horas, ni luego de 7 días de extraídos, a menos que el profesional facultado para el diseño apruebe algo diferente.

El concreto de la zona representada por los núcleos, se considera estructuralmente adecuado, si se cumplen simultáneamente los siguientes criterios:

- El promedio de los 3 núcleos $\geq 85\%$ de $f'c$.
- Ningún núcleo tiene una resistencia $< 75\%$ de $f'c$.

El ensayo debe realizarse siguiendo el procedimiento de la NTC 3658. En general, la extracción exige el empleo de un taladro con brocas diamantadas. Es necesario que el concreto haya adquirido una resistencia suficiente, de modo que el espécimen no se altere y la estructura no se deteriore; una edad superior a 14 días puede resultar adecuada.

Se debe asegurar que la toma se realice en forma perpendicular a la superficie del elemento, en zonas donde no haya juntas, cuidando de no cortar el acero de refuerzo, y que no se encuentre próxima a los bordes.

El ensayo de los núcleos se realiza de manera similar a los cilindros. El diámetro de los núcleos también debe cumplir con una relación 1:2 (diámetro:altura). Los especímenes deben tener las caras paralelas y perpendiculares a su eje, condición que se logra con un aserrado, eliminándose de paso las irregularidades mayores a 5 mm; se deben refrentar con mortero de azufre o con almohadillas de neopreno.

Cuando se trata de núcleos en forma de viga para evaluar la resistencia de una losa de piso o de un pavimento, las sierras usadas en su extracción también deben ser diamantadas. La sección transversal debe tener 150 X 150 mm y, al menos, 530 mm de longitud. Las caras de contacto con los apoyos deben ser paralelas. Se debe mirar que las probetas no presenten grietas o defectos que puedan alterar los resultados, caso en el que se de-

ben rechazar.

b) Prueba de carga

En caso de que los ensayos de los núcleos no cumplan con los parámetros establecidos, y la seguridad estructural permanezca en duda, la NSR - 10, establece que se pueden ordenar pruebas de carga acorde con el capítulo .20.3 de la norma.

La prueba de carga es un procedimiento que permite determinar el comportamiento global de una estructura. Consiste, como su nombre lo indica, en cargar el elemento o la porción que tiene el concreto en duda, de manera que simule los esfuerzos a que estará sometido, y monitorear su desempeño (Figura 13.6).

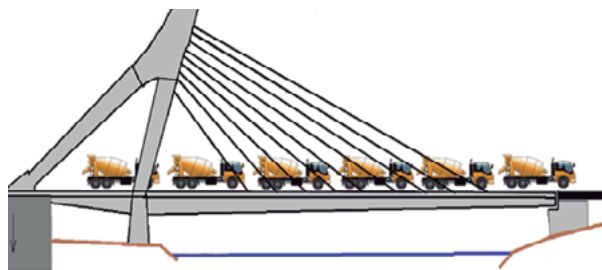


Figura 13.6. Esquema de una prueba de carga en un puente

En la NSR-10 se regula el procedimiento de ensayo, la forma de aplicación de la carga, los factores para el monitoreo, los criterios de aceptación y las precauciones de seguridad que hay que tener para su realización.

La norma establece que la prueba de carga no se debe realizar hasta que la porción de la estructura tenga por lo menos 56 días de edad. Se puede realizar a una edad menor, si el supervisor técnico, el constructor, el propietario y todas las partes involucradas están de acuerdo.

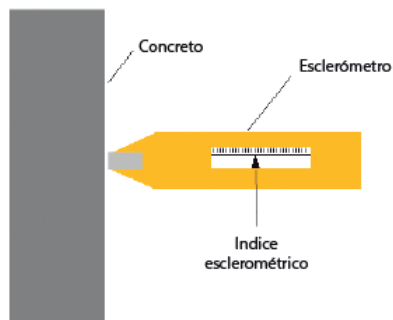


Figura 13.7 Ensayo con esclerómetro

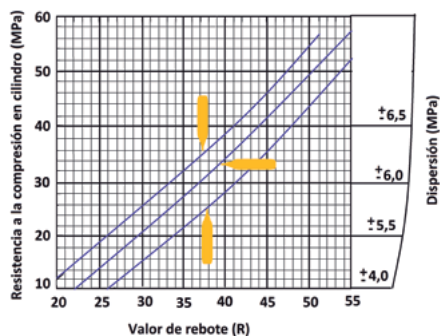
La prueba de carga se considera como destructiva, en la medida que, durante su ejecución, la estructura puede fallar. Dentro del criterio de aceptación, se establece, que la porción de la estructura ensayada no debe mostrar evidencias de falla, como descascaramiento o aplastamiento del concreto.

c) Pruebas alternas

De forma paralela a la toma de núcleos, también se pueden realizar otras pruebas, que aunque no las regula ni las contempla la NSR - 10 como factor decisivo de aceptación o rechazo del concreto, se pueden usar como medio informativo para determinar el estado de la estructura. Las pruebas más usadas en el medio colombiano son el esclerómetro y el ultrasonido y, con menos regularidad, el perno anclado y la pistola de Windsor, entre otras.

d) Pruebas con esclerómetro

El esclerómetro, también conocido como martillo de rebote Schmidt, es considerado como uno de los ensayos no destructivos, en la medida que facilita indirectamente la verificación de la resistencia del concreto sin causar daño al elemento. Consiste en un aparato cuyo mecanismo permite determinar la dureza superficial del concreto endurecido, mediante el rebote producido por una pequeña masa de acero disparada contra la superficie del concreto, por medio de un resorte calibrado (Figura 13.7), de modo que, a mayor dureza de la superficie, mayor es el rebote. El valor obtenido (denominado índice esclerométrico) se registra en una escala, el cual se correlaciona empíricamente con la resistencia a la compresión.



Para la realización del ensayo hay que tener en cuenta varios factores, como la inclinación de la superficie sobre la que se quiere medir, pues la gravedad afecta el rebote. De otro lado, la superficie de ensayo debe estar lo más limpia y lisa posible. Se debe asegurar que el golpe no se realice sobre una piedra (agregado grueso), sobre el acero de refuerzo, y que esté libre de cualquier tipo de recubrimiento. En el evento de que el concreto se encuentre carbonatado, la limpieza debe penetrar hasta una profundidad de por lo menos 5 mm. Se recomienda hacer como mínimo 10 mediciones en una superficie de 200 X 200 mm. De los datos obtenidos, hay que descartar los que difieran en más de siete unidades del promedio. En el evento de que se descarten más de tres datos, se debe realizar la medición en otra zona representativa; el valor del sector en medición, será el promedio de los datos válidos.

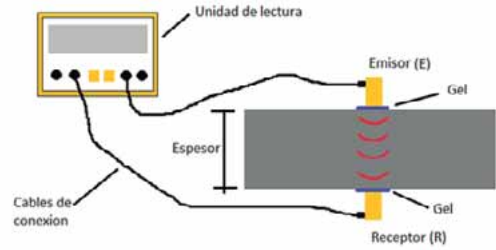
Dado que la medición del índice esclerométrico se basa en un resorte, el esclerómetro se debe calibrar periódicamente. El procedimiento de ensayo se encuentra estandarizado en la ASTM C805.

Es importante recalcar que este ensayo no es sustituto de los núcleos ni de los cilindros, teniendo un significado meramente informativo y complementario, y de referencia cualitativa. Permite conocer la resistencia a la compresión relativa y la uniformidad de la resistencia en una estructura.

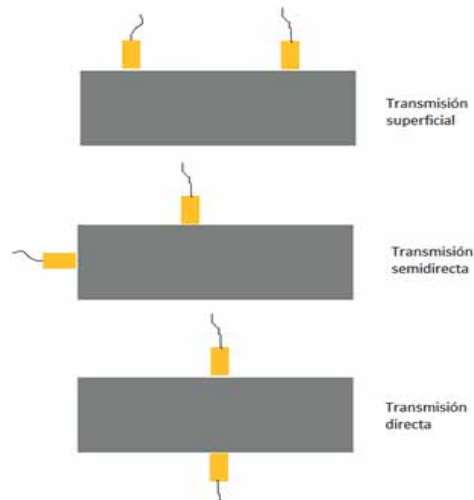
e) Pruebas con ultrasonido

La prueba de velocidad de pulso ultrasónico se basa en el principio de la velocidad del sonido en un sólido. El procedimiento para su determinación se encuentra estandarizado en la ASTM C597. En general, consiste en determinar mediante un ultrasonido, el tiempo que tarda una onda en atravesar una distancia conocida, de modo que la velocidad de pulso ultrasónico resulta de dividir la distancia recorrida entre el tiempo tardado en recorrerla.

Específicamente, el ultrasonido consta de dos palpadores (Figura 13.8), uno emisor de ondas (E) y otro receptor de las ondas (R), colocados a cierta distancia (e), de manera que se pueda medir el tiempo de viaje de la onda a través del concreto, el cual se registra en un reloj electrónico incluido en el equipo. A mayor compacidad del concreto, mayor resistencia y, en consecuencia, menor tiempo de viaje de la onda; por el contrario, a menor compacidad menor resistencia y, por tanto, la onda tarda más tiempo.



a) Esquema general de funcionamiento



(b) Posibles posiciones de los palpadores

Figura 13.8. Tipos de medición por ultrasonido (13.5 y 13.8) †

Para obtener mediciones confiables es necesario que haya buen contacto de los palpadores con la superficie del concreto, por lo que ésta se debe encontrar muy limpia y lo más lisa posible; generalmente al colocar vaselina o grasa para mejorar la adherencia, se mejoran estas condiciones.

Otro aspecto que influye en la medición es la dirección en que viaja la onda, pues si los palpadores se colocan en la misma dirección del acero de refuerzo, la onda viajará a través de la barra, por lo que la medición no será representativa. Esta situación se evita ubicando y marcando previamente la posición del acero, mediante un identificador llamado “ferroscan” (conocido en el medio como “pachometro”).

Por lo anterior, es posible calificar la calidad del concreto con base en la medición de la velocidad de pulso ultrasónico, para lo que se usan los indicadores mostrados en la Tabla 13.5.

Tabla 13.5. Calificación del concreto mediante velocidad de pulso ultrasónico (13.5)

Velocidad ultrasónico (m/s)	Calificación del concreto
> 4.500	Excelente
Entre 3.600 y 4.500	Bueno
Entre 3.000 y 3.600	Dudoso
Entre 2.100 y 3.000	Malo
< 2.100	Muy malo

La relación entre la velocidad de pulso ultrasónico y la resistencia, se debe determinar experimentalmente para cada concreto en particular. Al igual que el esclerómetro, presenta limitaciones, por lo que sus resultados se deben usar únicamente con fines informativos a las pruebas obtenidas con los cilindros y los núcleos, pero nunca sustituirlos. La prueba permite determinar la uniformidad del concreto, medir y detectar grietas, entre otras.

f) Otras pruebas

Se han desarrollado otras pruebas que permiten, al igual que el esclerómetro y el ultrasonido, complementar los resultados de la resistencia del concreto. Uno de ellos es el de Penetración (Figura 13.9), que mide la profundidad de penetración de clavos de acero, introducidos en la superficie mediante una pistola accionada con explosivos (Pistola de Windsor), cuyo procedimiento se encuentra estandarizado en la ASTM C803. La penetración lograda por el clavo (probeta) mide, de manera indirecta, la dureza del concreto que se relaciona con su resistencia. Este ensayo requiere de la frecuente calibración de la pistola, en especial si se cambia de explosivo. Además, los resultados de la prueba son influenciados por la rugosidad de la superficie y la dureza y tipo de agregado, de modo que para lograr una adecuada precisión, es necesario establecer una curva de calibración del concreto en particular a ser ensayado, usando núcleos o testigos fundidos.

Otra prueba desarrollada es la denominada Pullout, o de arrancamiento, que tiene su procedimiento de ensayo en la norma ASTM C900 (Figura 13.10).

Consiste en medir la fuerza necesaria para arrancar unos pernos de acero embebidos en el concreto, dejados en el momento del vaciado. La fuerza requerida para extraer los pernos indica, de manera directa, la resistencia al esfuerzo cortante y, mediante una correlación apropiada, con la resistencia a la compresión.

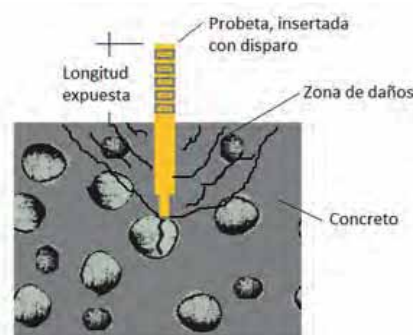


Figura 13.9. Pistola de Windsor probando un muro de concreto in situ

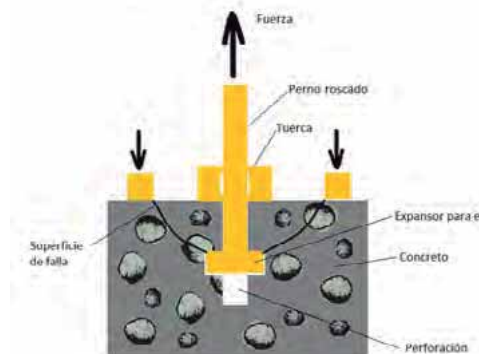


Figura 13.10. Ensayo de Pullout en mampostería de concreto

Por otra parte, los ensayos de madurez últimamente se han venido usando con mayor frecuencia en las obras. El principio de la madurez se refiere al desarrollo de la resistencia en función del tiempo y la temperatura del concreto. Para el efecto, se han desarrollado índices de madurez, como el de la norma ASTM C1074. La precisión de la prueba depende de la exactitud con la que se halle la función resistencia-madurez para un determinado concreto. El aparato emplea termopares y termoresistores colocados en el concreto, los cuales, conectados a un registrador de datos, grafican la temperatura en función del tiempo, que a su vez se

correlacionan con los ensayos de compresión realizados con cilindros, para generar una curva de tiempo-temperatura versus resistencia, usada para para estimar la resistencia del concreto en la estructura.

13.4 Referencias y bibliografía recomendada

13.1 ACI 214 - 77. Práctica Recomendada para la Evaluación de Resultados de Ensayos de Resistencia de Concreto. ACI, Farmington Hills, Mi.1988.

13.2 ACI 301S-10. Especificaciones para Concreto Estructural. ACI, Farmington Hills, Mi., 2011.

13.3 ACI - AMERICAN SOCIETY OF CONCRETE CONTRACTORS. Guía del Contratista para la Construcción del Concreto de Calidad. ACI, Farmington Hills, Mi.2008.

13.4 ASOCIACIÓN DE INGENIERÍA SÍSMICA. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - NSR - 10. AIS, Bogotá 2011.

13.5 INSTITUTO CHILENO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGÓN. Compendio de Tecnología del Hormigón. Santiago de Chile, ICH.CH. 1988.

13.6 MATA LLANA R. Fundamentos de Concreto Aplicados a la Construcción. ICPC, Bogotá, 2007.

13.7 PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Illinois, PCA 2004.

Anexo

Sistema de unidades de medida

En general existen tres sistemas de unidades de medida: el Métrico, el Inglés y el Internacional. El Sistema Métrico es el más usado por la mayoría de países del mundo, empleando las siguientes medidas:

- Longitud: milímetros, mm; centímetros, cm; y metros, m.
- Masa: gramos, g y kilogramos, kg.
- Volumen: litros, l.
- Esfuerzo: kilogramos fuerza, kg/unidad de área.
- Temperatura: grados Celsius, °C.

El sistema inglés es empleado casi que exclusivamente por los Estados Unidos (denominado sistema Americano), usando las siguientes unidades:

- Longitud: pulgadas, pul; pies, ft; y yardas, yd.
- Masa: libras, lb; y toneladas, t.
- Volumen: galones, gal.
- Esfuerzo: libras por pulgada cuadrada, lb/pul² o psi.
- Temperatura: grados Fahrenheit, °F.

A raíz de la apertura de fronteras en un mundo globalizado, en donde las actividades en el diseño y la construcción se internacionalizaron, creándose una necesidad cada vez más creciente de hablar el mismo lenguaje en las medidas.

Dado que el Sistema Métrico, es más simple que el Sistema Inglés, y que hace algunos años intentaron mejorarlo y aceptarlo universalmente, fue creada una nueva versión del Sistema Métrico llamado sistema Internacional de Unidades (SI), presentado y aprobado en 1960 por 30 naciones participantes en la Conferencia General de Pesas y Medidas. Las siguientes son las unidades definidas:

- Longitud: metros, m.
- Masa: kilogramos, kg.
- La fuerza requerida para acelerar una masa de 1 kg por 1 m: Newton, N.

- Esfuerzo: Pascal, Pa = N/m².
- Prefijos para la formación de múltiplos y sub múltiplos de varias unidades son apreciados en la Tabla A.1.

Tabla A1. Múltiplos y submúltiplos del SI, prefijos y símbolos

Factor multiplicador	Prefijo	Símbolo (SI)
1 000 000 000 000 = 10 ⁹	giga	G
1 000 000 = 10 ⁶	mega	M
1 000 = 10 ³	kilo	k
100 = 10 ²	hecto	h
10 = 10 ¹	deka	da
0,1 = 10 ⁻¹	deci	d
0,01 = 10 ⁻²	centi	c
0,001 = 10 ⁻³	mili	m
0,000 001 = 10 ⁻⁶	micro	μ
0,000 000 001 = 10 ⁻⁹	nano	N

Hacia 1975, el Congreso de los Estados Unidos aprobó el Acta de Conversión Métrica, que declara la política de los Estados Unidos para coordinar y planear el uso creciente del SI. Es así, como aún se usa el Sistema Inglés y SI como un bilingüismo. De hecho, las normas ASTM han venido creando la versión métrica, denominada con la letra M (pe ASTM C39M). Para Colombia, específicamente en el caso del concreto, la gran mayoría de las Normas Técnicas Colombianas - NTC, han sido homologadas de las ASTM, por lo que tienen como base el SI y muchas cuentan como alterno el Sistema Inglés. Las Tablas A.2 y A.3, muestran algunas conversiones de los diferentes sistemas.

sido homologadas de las ASTM, por lo que tienen como base el SI y muchas cuentan como alterno el Sistema Inglés.

Las Tablas A.2 y A.3, muestran algunas conversiones de los diferentes sistemas.

Tabla A.2. Conversión de algunos factores de medida entre diferentes sistemas de unidades

Para convertir de	a	Multiplicar por
Yardas, yd	Metros, m	0,9144
Pies, ft	Metros, m	0,3048
Pulgadas, pul	Milímetros, mm	25,4
Yardas cúbicas, yd ³	Metros cúbicos, m ³	0,7646
Galones americanos	Metros cúbicos, m ³	0,003785
Galones americanos	Litros, l	3,785
Libras masa, lb	Kilogramos, kg	0,4536
Tonelada americana, t	Toneladas, t	0,9072
Libra/yarda cúbica, lb/ yd ³	Kilogramos/metro cúbico, kg/m ³	0,5933
Kilogramos fuerza, kgf	Newtons, N	9,807
Libras fuerza, lbf	Newtons, N	4,448
Kips/pulgada cuadrada, ksi	Megapascales, MPa o N/mm ²	6,895
Grados Fahrenheit, °F	Grados Celsius, °C	(°F - 32)/1,8

Tabla A.3. Relación entre los sistemas de unidades para la conversión de la medida de resistencia

1 lbf/pul ² (psi) = 0,0703 kgf/cm ²
1 kgf/cm ² = 14,22 lbf/pul ²
1 MPa = 10.19 kgf/cm ²

El concreto, a lo largo de la historia, ha sido un material protagonista en las grandes obras de ingeniería y construcción, además es reconocido por su versatilidad y desempeño.

El ser humano ha utilizado el concreto por cientos de años en sus construcciones, sin embargo, el presente y futuro del sector exigen un concreto con atributos y propiedades que le permitan mejorar su desempeño en términos de durabilidad, resistencia, peso y que esté acorde con las buenas prácticas ambientales.

Los grandes retos y oportunidades que enfrenta la ingeniería y construcción en Colombia nos motivan a desempeñar un rol activo en la transformación del país incorporando innovaciones tecnológicas que permitan atender las necesidades de la infraestructura y vivienda, ofreciendo a la sociedad espacios más seguros y confortables.

En este libro el Ingeniero Ricardo Matallana Rodríguez entrega en cada capítulo un contenido profundo de los componentes y nuevas tecnologías en concretos, que le permitirá a ingenieros en formación y en ejercicio de su profesión contar con fundamentos técnicos que agregan valor en las diferentes etapas del diseño, planeación y construcción de edificaciones e infraestructura del país.

ISBN: 978-958-57497-3-3



9 789585 749733