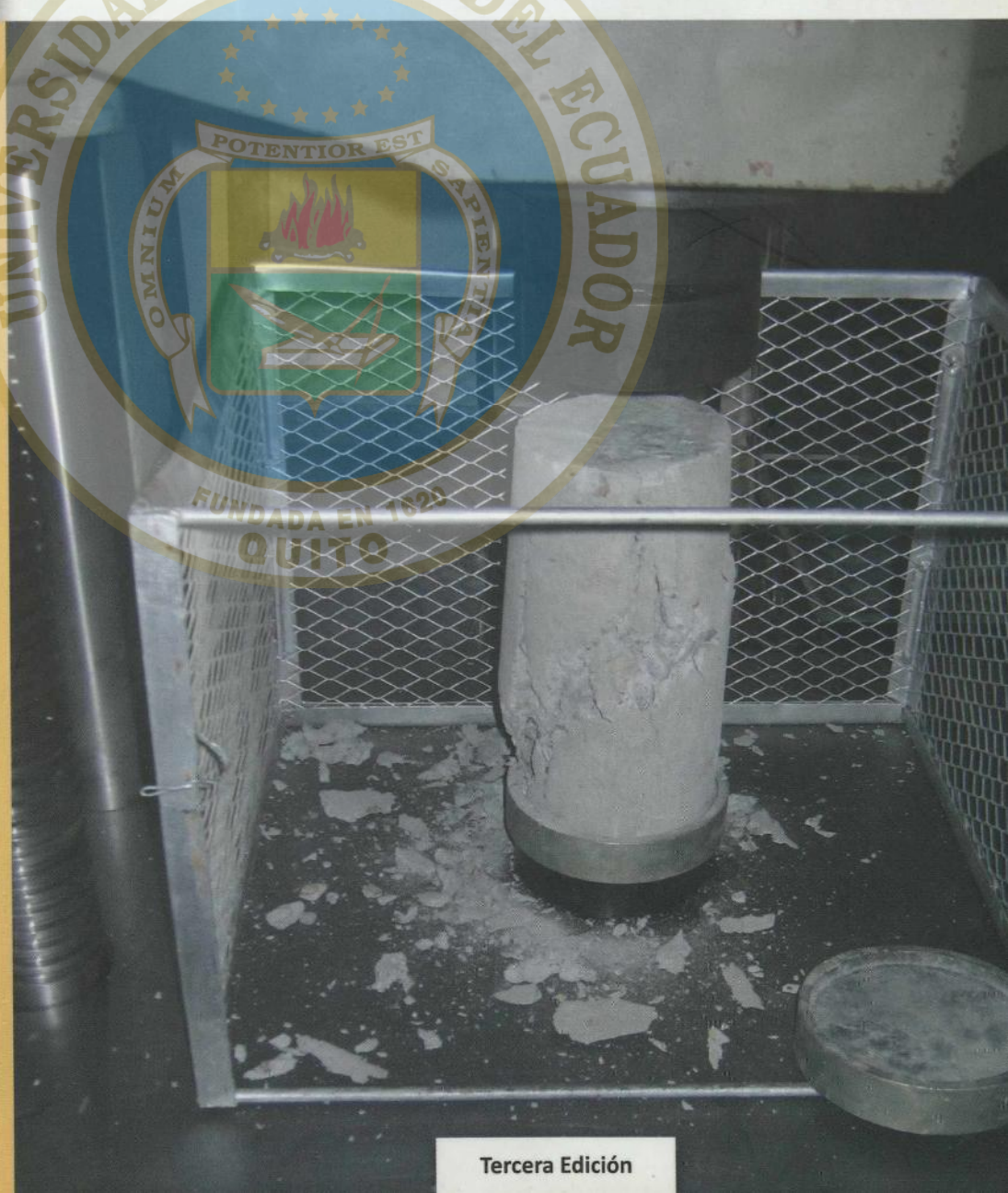
COLECCIÓN DEL CONCRETO

Tecnología del Concreto

Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas

Tomo 1



- Generalidades
- Cemento
- Agua
- Agregados
- Aditivos
- Morteros
- Propiedades
- Lista de chequeo
- Diseño de mezclas
- Glosario

Asocreto
Asociación Colombiana de Productores de Concreto

Tercera Edición

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1826
QUITO

Sistema Integrado de Bibliotecas
Biblioteca digital UCE
Calle Jerónimo Leyton y Gato Sobral – Cdla. Universitaria
+593 2230757 ext: 808 biblioteca.general@uce.edu.ec

BASE LEGAL PARA DIGITALIZACIÓN DE LIBROS CON DERECHOS DE AUTOR

El Sistema Integrado de Bibliotecas de la Universidad Central del Ecuador, digitalizará su acervo bibliográfico siempre y cuando sea para fines educativos y de investigación. No se permite la reproducción y distribución para la comercialización directa e indirecta del mismo.

La digitalización del material bibliográfico se lo realiza de acuerdo al Código Orgánico De La Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación Art. 212 numeral 9, Literal ii "(…) Una biblioteca o archivo podrá, además, realizar los siguientes actos (…) La reproducción electrónica y comunicación pública de obras de su colección para ser consultadas gratuita y simultáneamente hasta por un número razonable de usuarios, sólo en terminales de redes de la respectiva institución o para usuarios de esa institución bajo su control, en condiciones que garanticen que no se puedan hacer copias electrónicas de esas reproducciones" y literal vii "La reproducción, adaptación, traducción, transformación, arreglo, distribución y comunicación de una obra protegida por derechos de autor o una prestación protegida por derechos conexos, en uno o más formatos accesibles para el uso exclusivo de personas con discapacidad".

Este material se considera un producto intelectual a favor de su autor; por tanto, la titularidad de sus derechos se encuentra protegida por el Código Orgánico De La Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación. La violación a dichos derechos constituye un delito que será responsabilidad del usuario.

Este libro está disponible físicamente en:

BIBLIOTECA	Biblioteca General			**PISO**	02
				ESTANTE	22
				BANDEJA	02
CONVENIO INTERINSTITUCIONAL		**UNIVERSIDAD**			

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

E22-B2

ESTE LIBRO ES PROPIEDAD DEL SIB-UCE
SU VENTA ES PENADA POR LA LEY

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST
OMNIUM
SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

620.1
S211
T.1

COLECCIÓN DEL

CONCRETO

Tecnología de Concreto

TOMO 1

Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST
FUNDADA EN 1620
QUITO

ID = 1665 fol 86490

Asocreto
Asociación Colombiana de Productores de Concreto

© Asociación Colombiana de Productores de Concreto - ASOCRETO

COLECCIÓN DEL CONCRETO - TECNOLOGÍA DEL CONCRETO - Tomo 1
Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas
Primera edición: 1995
Segunda edición: 1997
Sexta reimpresión: 2005
Tercera edición: 2010

Primera edición preparada por:
Ing. Jaime Gomezjurado Sarria

Segunda edición revisada y actualizada por:
Diego Sánchez de Guzmán Ing. Civil, MIC, M Sc IS
Ing. Jesús David Osorio Redondo

Tercera edición revisada y actualizada por:
Ing. Jairo René Niño Hernández

Fotografía:
Jesús David Osorio Redondo
Alicia María Durán Franch
Liliana Ospino Pineda
Martha Lucía Henao
Juan José Vejarano
Omar Javier Silva Rico

Diseño y Diagramación:
Martha E. Zua Delgado
Michael Reyes Aristizábal

INVENTARIO
Compra ✓ Donación ..... Canje .....
Proveedor LIBRERIA .....
Factura 20407 Fecha 19/09/12 Precio 60.20
N° Inf. Recp ..... Fecha Inf .....
N° Alta 5135990 .....
Biblioteca GENERAL .....

ASOCRETO realiza este libro con el propósito de divulgar e informar sobre temas relacionados con el concreto. La información y conceptos expresados en esta publicación y el uso que se haga de ellos, no representan responsabilidad alguna para ASOCRETO ni para los autores o sus empresas. La información y conceptos deben ser utilizados por las personas interesadas bajo su criterio y responsabilidad. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada en sistema recuperable o transmitida en ninguna forma por medio magnético, electrónico, mecánico, fotocopia, grabación u otros, sin previa autorización escrita de ASOCRETO

ISBN: 978-958-8564-03-6

Impreso en Colombia
Printed in Colombia
Impreso por : Nomos Impresores

Esta edición del Libro TECNOLOGÍA DEL CONCRETO - Tomo 1. Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas se imprimió en papel fabricado a partir del residuo de la caña de azúcar. Es biodegradable y reciclable. Estamos comprometidos con la conservación del Medio Ambiente.

IMPRESO EN PAPEL ECOLÓGICO

Asociación Colombiana de Productores de Concreto - ASOCRETO
Calle 102 # 15-38, Bogotá, D.C., Colombia
PBX: 57 1 618 0018, FAX: 57 1 623 4205
E-mail: asocreto@etb.net.co
www.asocreto.org.co

UNIVERSIDAD CENTRAL
CONTROL DE BIENES
5135950
30237312

Advertencia

Legislación sobre derechos de autor Ley 23 de 1982

«Es permitido utilizar obras literarias o artísticas o parte de ellas, a título de ilustración en obras destinadas a la enseñanza, por medio de publicaciones, emisiones, radiodifusiones, grabaciones sonoras o visuales, dentro de los límites justificados por el fin propuesto, o comunicar con propósito de enseñanza la obra difundida para fines educativos, universitarios y de formación personal sin fines de lucro, con la obligación de mencionar el nombre del autor y el título de las obras utilizadas.»

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST
OMNIUM
SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Contenido

Presentación ix

Capítulo 1
Introducción a la tecnología del concreto 1

Generalidades 1
Definición de términos 2
Características de los componentes 2
Historia del concreto 3
Concreto transportado 8

Capítulo 2
Sistema internacional de unidades 9

Generalidades 9
Patrones del sistema internacional de unidades 9
Simbología técnica 10

Capítulo 3
Cemento Pórtland 19

Generalidades 19
Definición 19
Proceso de fabricación 19
Clasificación del cemento Pórtland 24
Cementos Pórtland adicionados 26
Otros cementos 28
Propiedades del cemento 29
Propiedades físicas y mecánicas 35

Capítulo 4
Agua para el concreto 47

Generalidades 47
Términos relativos al agua 47
Características del agua 48
Calidad del agua 49
Ensayos sobre el agua 53

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM SCIENTIAE SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Capítulo 5
Agregados y áridos 55

Generalidades 55
Definición 55
Origen de los agregados naturales 55
Clasificación de los agregados 58
Propiedades de los agregados 60

Capítulo 6
Aditivos 89

Generalidades 89
Definición 89
Uso de aditivos 89
Propiedades del concreto con aditivos 89
Clasificación de los aditivos 90
Control de calidad de los aditivos 97

Capítulo 7
Propiedades del concreto fresco 99

Generalidades 99
Concreto en estado fresco 99
Proceso de fraguado 115

Capítulo 8
Propiedades del concreto endurecido 119

Generalidades 119
Resistencia 119
Masa unitaria 135

Capítulo 9
Propiedades del mortero 147

Generalidades 147
Tipos de morteros 148
Propiedades del mortero 152
Composición y efecto sobre las propiedades 162

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Capítulo 10
Listas de chequeo 173

Toma de muestras 173
Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra 174
Asentamiento 175
Temperatura del concreto 175
Masa unitaria y rendimiento 176
Contenido de aire - método de presión 177
Contenido de aire-método volumétrico 179
Refrentado utilizando mortero de azufre 180
Resistencia a la compresión 181
Resistencia a la flexión 182

Capítulo 11
Diseño de mezclas de concreto de peso normal 183

Alcance 183
Conceptos básicos 183
Datos previos 184
Método de dosificación 185
Ejemplos de aplicación 205
Referencias bibliográficas capítulo 11 216

Referencias 217

Glosario 219

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST
FUNDADA EN 1620
QUITO

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST
OMNIUM
SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Presentación

El concreto y el mortero son materiales fundamentales con los cuales los Arquitectos, Ingenieros, Constructores y trabajadores vinculados con el sector de la construcción, diseñan y elaboran las obras concebidas para el desarrollo de nuestras ciudades y su infraestructura.

Constituidos por diferentes materiales, los cuales debidamente dosificados y mezclados se integran para formar elementos monolíticos que proporcionan resistencia y durabilidad a las estructuras, dependen en su aplicación y en su evaluación, de un adecuado conocimiento de sus constituyentes y de sus propiedades físicas y químicas, las cuales deben ser estudiadas y analizadas conforme con los patrones de control de calidad.

La Asociación Colombiana de Productores de Concreto, ASOCRETO, consciente de esta necesidad, presenta este manual que contiene fundamentalmente la información relacionada con los materiales constituyentes, propiedades y ensayos de calidad, del concreto y el mortero, como soporte en la labor de aprendizaje y actualización de profesionales y técnicos vinculados con la construcción de obras en concreto.

En la tercera edición, la publicación se actualizó con el fin de utilizarla en cualquier país, ya que contiene referencias tanto a las Normas Técnicas Colombianas y a sus equivalentes, sean estándares de la ASTM o normas Europeas. Las normas de referencia se actualizaron a su última versión y se incluyeron nuevos estándares lo cual permitió involucrar nuevos tipos de concretos y métodos de control de calidad de los mismos, ya sea en estado fresco o endurecido. Como complemento se adicionó un glosario técnico con sinónimos de gran parte de los países latinoamericanos, para una mayor comprensión de los conceptos expresados.

Asocreto

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST
OMNIUM
SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGÍA DEL CONCRETO

Capítulo 1

Generalidades

El concreto puede ser definido como la mezcla de un material aglutinante (normalmente cemento Pórtland Hidráulico), unos materiales de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un sólido compacto y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de comprensión.

Se ha convertido en el material de construcción más ampliamente utilizado a nivel mundial, en razón a su extraordinaria versatilidad en cuanto a las formas que se pueden obtener; sus propiedades físicas y mecánicas para ser usado como elemento estructural; y, su economía; razones que lo hacen muy competente frente a construcciones de madera, mampostería o acero.

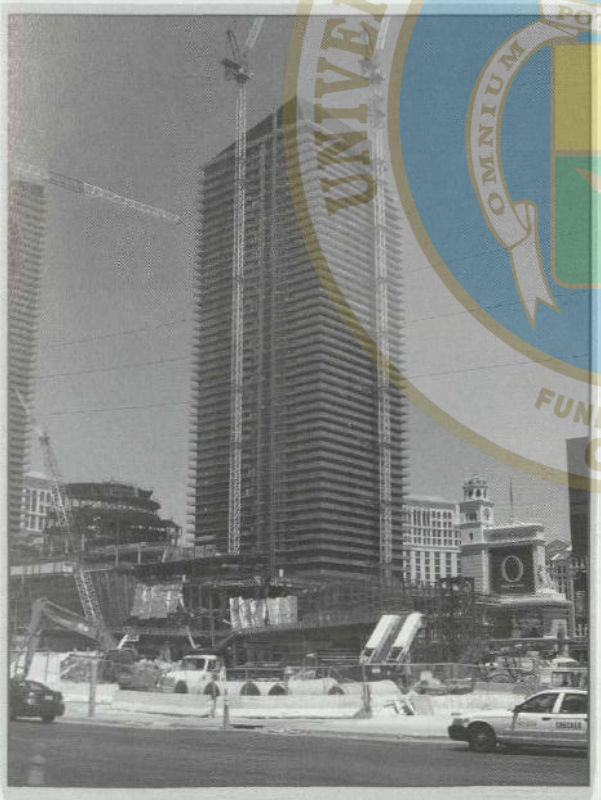


Figura I.1. Estructura de concreto

Generalmente se utiliza en estructuras de concreto armado, en las cuales existe un perfecto ¨matrimonio¨ entre el acero y el concreto, porque la asociación de estos dos materiales, proporciona un sólido único desde el punto de vista mecánico. El concreto, como las piedras naturales, aporta una resistencia muy grande a los esfuerzos de compresión; y las varillas de acero aportan resistencia a los esfuerzos de tracción. De tal forma que en conjunto pueden absorber todo tipo de esfuerzos (compresión, tracción y flexión, etc.) circunstancia que le permite desempeñarse como un gran material estructural.

El concreto, se produce a partir de un diseño de mezcla que consiste en la selección de los constituyentes disponibles (cemento, agregados, agua y aditivos) y su dosificación en cantidades relativas para producir, tan económicamente como sea posible, una masa volumétrica con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera las propiedades de resistencia, durabilidad, masa unitaria, estabilidad de volumen y apariencia adecuadas.

Las propiedades requeridas del concreto fresco están gobernadas por el tipo de construcción, las condiciones climáticas de la zona, por las técnicas de colocación y de transporte; por su parte, las propiedades del concreto endurecido están especificadas por el diseñador de la estructura. En general, cada tipo de construcción tiene requerimientos particulares que dependen de las condiciones climáticas, del sistema constructivo, del tiempo y de los costos de ejecución.

Definición de términos

En la figura 1.2 se representan esquemáticamente las proporciones aproximadas por volumen, de cada uno de los constituyentes del concreto. Con el objeto de dar una idea acerca del efecto que tienen las propiedades y las funciones de éstos, dentro de la masa, se definen algunos términos de uso común.

Pasta o Pegante

El término pasta se refiere a la mezcla de cemento, agua, aire (naturalmente atrapado o intencionalmente incorporado) y aditivos (cuando son empleados).

Cuando el concreto se encuentra en estado plástico, la pasta actúa como lubricante de los agregados, comunicando fluidez a la mezcla, lo cual permite que la colocación y compactación sean adecuadas.

Cuando la mezcla se encuentra en estado endurecido, la pasta de cemento al aglutinarse, obtura los espacios que hay entre las partículas y reduce la permeabilidad del concreto, evitando el desplazamiento de agua dentro de la masa endurecida. Este efecto es importante, en estructuras que estén expuestas a la acción de aguas agresivas, las cuales eventualmente pueden deteriorar la masa, haciéndole perder resistencia.

Adicionalmente, la pasta fraguada y endurecida en unión de los agregados (áridos), contribuye a suministrar la resistencia mecánica característica a la compresión, lo cual depende de la llamada interfase agregado-pasta, o agregado-matriz.

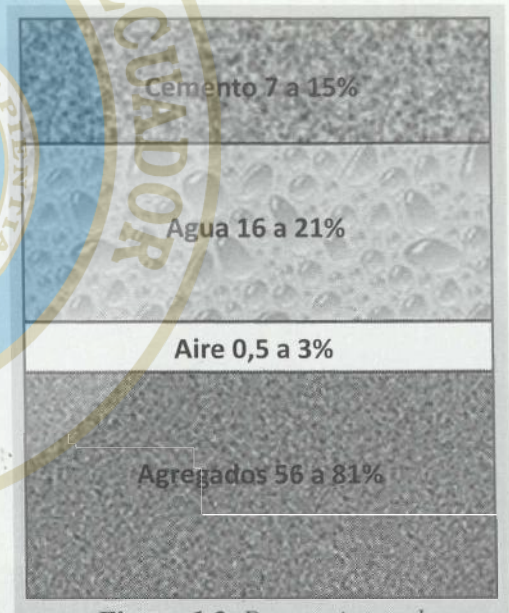


Figura 1.2. *Proporciones de materiales usados en la producción de concreto por volumen.*

Mortero

Este término se refiere a la mezcla de pasta y agregado fino (arena), la cual es utilizada en la nivelación de pisos, en la estabilización de taludes y especialmente en la construcción de mampostería, en donde se usa como pega de ladrillos o como recubrimiento de muros, caso en el cual se le conoce como pañete, repello o revoque.

Concreto

Este término se refiere a la mezcla de mortero y agregado grueso (grava). Algunos países de habla hispana lo denominan también hormigón.

Características de los componentes

Cemento

Los cementos hidráulicos son aquellos que tienen la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, porque reaccionan químicamente con ella para formar un material de buenas

propiedades aglutinantes. El más utilizado, como se mencionó, es el cemento Pórtland hidráulico, el cual tiene propiedades de adhesión y cohesión, que permiten aglutinar los agregados para conformar el concreto.

Estas propiedades dependen de: su composición química, el grado de hidratación, la finura de las partículas, la velocidad de fraguado, el calor de hidratación y la resistencia mecánica que es capaz de desarrollar.

Agua

El agua como componente del concreto es el elemento que hidrata las partículas de cemento y hace que éstas desarrollen sus propiedades aglutinantes. Al mezclarse con el cemento se produce la pasta, la cual puede ser más o menos fluida, según la cantidad de agua que se agregue. Al endurecer la pasta, como consecuencia del fraguado, parte del agua permanece en la estructura rígida de la pasta (agua de hidratación), y el resto es agua evaporable.

Aire

Cuando el concreto se encuentra en proceso de mezclado, es normal que atrape aire dentro de la masa, el cual es posteriormente liberado por los procesos de compactación a que es sometido una vez ha sido colocado. Sin embargo, es imposible extraer todo el aire y siempre queda un porcentaje dentro de la masa endurecida. Por otra parte, en algunas ocasiones se incorporan pequeñísimas burbujas de aire, por medio de aditivos, con fines específicos de durabilidad, como se verá en el capítulo de concreto en estado endurecido.

Agregados

Los agregados para concreto pueden ser definidos como aquellos materiales inertes que poseen una resistencia propia suficiente (resistencia del grano), que no perturban ni afectan el proceso de endurecimiento del cemento hidráulico y que garantizan una adherencia con la pasta de cemento endurecida. Estos materiales pueden ser naturales o artificiales, dependiendo de su origen.

La razón principal para utilizar agregados dentro del concreto, es que éstos actúan como material de relleno, haciendo más económica la mezcla. Los agregados, en combinación con la pasta fraguada, proporcionan parte de la resistencia a la comprensión.

Cuando la mezcla de concreto pasa del estado plástico al estado endurecido durante el proceso de fraguado, los agregados controlan los cambios volumétricos de la pasta evitando que se generen agrietamientos por retracción plástica, los cuales puedan afectar la resistencia del concreto.

Aditivos

Los aditivos son materiales distintos del agua, de los agregados, del cemento hidráulico y de las fibras de refuerzo que se utilizan como ingredientes del concreto y, se añaden a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado, con el objeto de modificar sus propiedades para que sea más adecuada a las condiciones de trabajo o para reducir los costos de producción.

Historia del concreto

Probablemente el empleo de materiales cementantes se remonta al inicio de la civilización cuando el hombre se vio en la necesidad de construir su habitación utilizando arcilla o una

mezcla de cal y arena para unir las piedras y conformar una estructura simple que le sirviera de protección. No hay forma de determinar la primera vez que se utilizó un material aglomerante, sin embargo, hay vestigios que indican que la obra de concreto más antigua fue construida alrededor de los años 5600 a.C. en las riberas del río Danubio en Yugoslavia. Esta obra estaba conformada por los pisos para chozas en un pueblo de la edad de piedra. Después de esta aplicación no se tiene noticia de la utilización de ésta técnica hasta el año 2650 a.C. cuando los egipcios construyeron las pirámides de GIZET, en donde los bloques de piedra de esta obra, conformada por las pirámides de Cheops (137 m), Chefrén (136 m) y Miserino (62 m), fueron pegados con un mortero hecho de yeso calcinado impuro y arena; a esta obra, siguieron otras que aún se encuentran a lo largo del río Nilo.

Posteriormente, en el año 500 a.C los antiguos griegos mezclaron compuestos basados en caliza calcinada (cal viva) y agua a la cual se adicionaba arena, para recubrir y unir piedras y ladrillos no cocidos, llegando a mencionarse que los palacios de Creso y Atala fueron construidos de esta forma. La adición a estas mezclas, de piedra triturada, tejas rotas o ladrillo, dieron origen al primer concreto de la historia. Probablemente, la civilización romana copió la idea de la producción de concreto de los griegos. Se han encontrado obras de concreto romanas fechadas con anterioridad al año 300 a.C.

Como los morteros de cal viva no resistían muy bien la acción del agua durante períodos largos, se presume que a ésta mezcla se incorporaron toda clase de agregados y durante estas pruebas empíricas se descubrió que la arena proveniente de ciertas rocas volcánicas tenía mayor resistencia y duración tanto en aguas dulces como saladas. Por ejemplo, los griegos emplearon una toba volcánica extraída de la Isla de Santorín y los romanos usaron un material con apariencia de arena rosada que se encuentra en gran cantidad alrededor de la bahía de Nápoles, el cual es una ceniza volcánica que contiene sílice y alúmina que se combinan químicamente con la cal dan como resultado lo que luego se conociera como cemento puzolánico. Este nombre obedece a que se le encontró por primera vez en la región donde estaba la población de Puzzulí, cerca del Vesubio. Con éste material se construyó el teatro de Pompeya en el año 75 a.C.

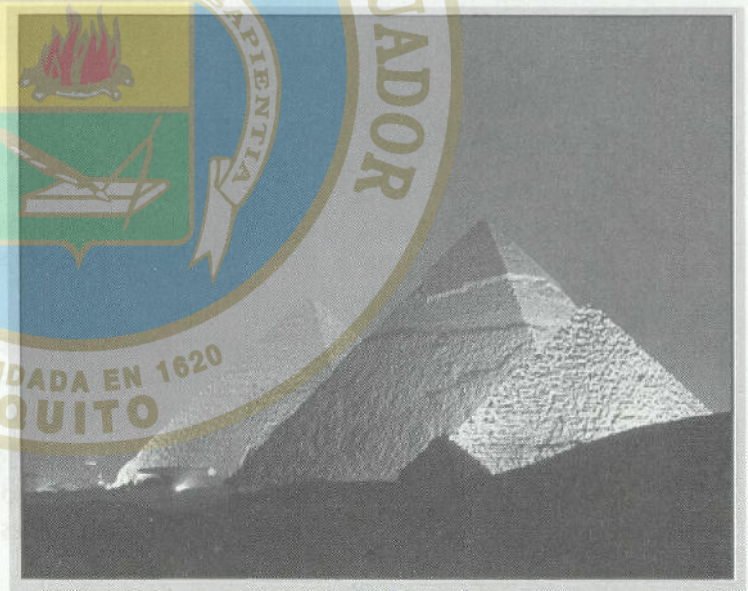


Figura 1.3. Pirámides de Egipto

Existen evidencias de intentos romanos para reforzar algunas de las estructuras que construyeron con barras y láminas de bronce, sin embargo, como los resultados no fueron satisfactorios, porque se presentaban agrietamientos y descascaramientos; diseñaron sus obras para soportar cargas de compresión, resultando estructuras con muros excesivamente gruesos y pesados, algunos de más 8 metros de espesor. Para reducir el peso de los muros se optó por aligerar el concreto mediante la inclusión de jarras de barro en su masa, la utilización de agregado de baja densidad de procedencia volcánica y el diseño de arcos.

Con esta técnica de concreto aligerado fueron construidos algunos arcos del coliseo romano, la Basílica de Constantino y también el domo del Panteón, el cual es una de las estructuras antiguas más interesantes y fue la de mayor luz (diámetro 50 metros) durante mucho tiempo. Obras que dan testimonio de la propiedad que tiene el concreto para soportar los embates de la naturaleza y permanecer durante largo tiempo.

Con la caída del imperio romano declinó el uso del concreto y muchos de los conocimientos desarrollados desaparecieron completamente. La técnica comenzó a ser recobrada en Inglaterra y se tienen evidencias que hacia el año 700 d.C. se construyeron en Saxon elementos mezclados de concreto en forma de recipientes superficiales en la roca, de diámetro 2 y 3 metros, encontrándose que empleaban en la fabricación del concreto y el mortero una caliza del sector como agregado y cal quemada como cementante. Los Normandos emplearon concreto como material llenante en muros que luego eran recubiertos con piedra. De esta técnica da fe la abadía de Reading en la región de Berkshire, donde el recubrimiento de piedras cayó totalmente y dejó al descubierto el esqueleto en concreto.

Durante la edad media y el renacimiento el concreto fue poco empleado. Posiblemente no se uso en gran escala por la mala calidad debida a una cocción incompleta de la cal, descuido en la mano de obra y carencia de tobas volcánicas. Después del siglo XII, mejoró la calidad y de nuevo se utilizó gracias a una perfecta calcinación de la cal y al uso de algún material similar en propiedades a las tobas volcánicas anteriormente mencionadas. El Trass de Andernach, junto al Rhin, es una obra de esta época construida con el material descrito.

La catedral de Salisbury tiene una cimentación en concreto que aún permanece en buen estado; En la torre blanca, de la famosa torre de Londres, también se empleó ese material para su construcción. La casa Moretón en Cheshire, construida entre 1559 y 1580 tiene un piso superior hecho en un material que combina la cal, la arena y la ceniza de madera, el cual fue empleado en los cuartos que tenían chimeneas, con el fin de evitar los riesgos de incendio en los pisos de madera.

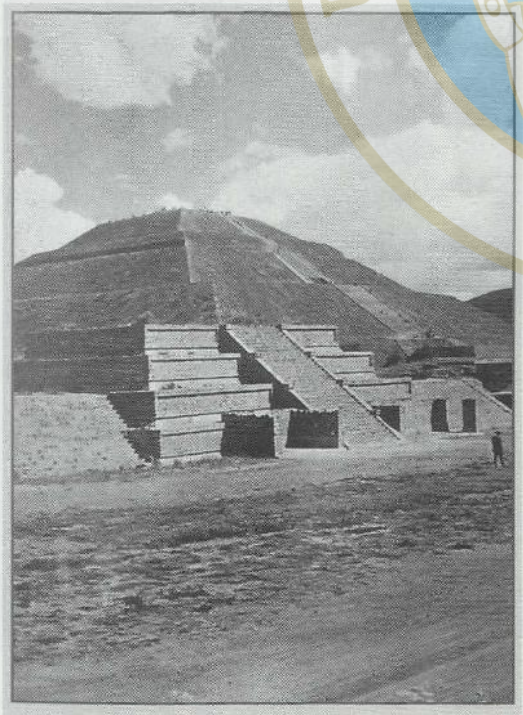


Figura 1.4. *Pirámide del Sol en Teotihuacán - México*

En Latinoamérica, hay muestras de desarrollo de materiales cementantes y estructuras imponentes como las ciudades construidas por los Mayas y los Aztecas en México, entre otras. Obras que resultan tan importantes como las pirámides de Egipto, e indican el gran desarrollo de la Ingeniería y de la tecnología del concreto, en esas civilizaciones precolombinas.

Durante los siglos posteriores, los avances fueron escasos hasta el punto de que solo llegó a producirse un mortero débil hecho únicamente de cal y arena. A principios de la edad moderna se presentó una disminución general en la calidad y la crisis llego al punto, de acabar con la fabricación y el uso del cemento.

Solamente hacia el siglo XVIII, en el cual se revivió el auge por la investigación, un ingeniero de Leeds fue comisionado para que construyera por tercera vez un faro en el acantilado de Edystone en la costa Cornwall, situado a unos 8 km de Plymouth en Inglaterra. Los dos primeros habían sido

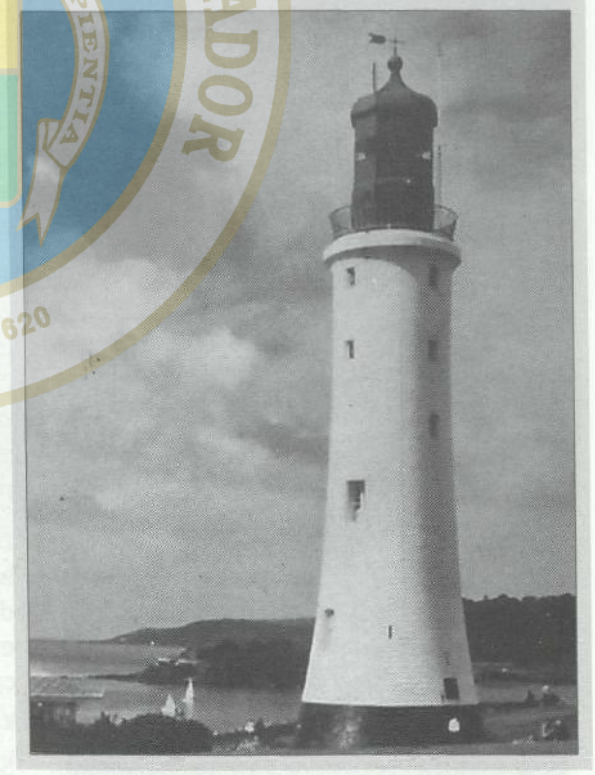
construidos en madera, siendo destruidos la primera vez por un incendio y la segunda por un vendaval. El encargado, John Smeaton, decidió adelantar una serie de estudios tendientes a encontrar la mejor solución para que el faro pudiera soportar el azote casi continuo del agua y, de estos estudios dedujo que la única manera de garantizar la resistencia de la construcción debía ser empleando piedra unida con un mortero producido con cal calcinada para formar una construcción monolítica la cual debía soportar en la parte inferior, la acción constante de las olas y de los vientos con alto contenido de agua de mar.

El faro se construyó con este mortero y rocas, en una operación que tardó 6 semanas, entrando en servicio en octubre de 1759. En el año de 1876 una parte de la estructura se debilitó y el faro fue reemplazado por uno más grande.

A petición de los habitantes de Plymouth, el antiguo faro fue desmontado hasta la cimentación y vuelto a erigir en esa ciudad, como monumento, el cual se conserva actualmente. La cimentación del faro todavía permanece en su sitio, desafiando al mar, después de más de 200 años de construida.

En los años siguientes, a este hallazgo, se desarrollaron muchos tipos de cementos hidráulicos y a partir de ese momento, mejora la calidad de los morteros y comienza el desarrollo del concreto, gracias a los adelantos conseguidos en el conocimiento de los cementos. Así se inicio una carrera por obtener cemento de construcción y en 1811, Dabbs obtuvo una patente para producirlo empleando arcilla y polvo de los caminos. Posteriormente el 21 de octubre de 1824 Joseph Aspdin un constructor de Leeds (Inglaterra), calcinó en un horno una mezcla de tres partes de piedra caliza por una de arcilla, la cual molió y pulverizó y consiguió la patente para producir el primer cemento Pórtland; así llamado porque la coloración del mismo le recordaba al inventor, el color grisáceo de las rocas de Pórtland. La patente solo nombraba los ingredientes básicos, sin entrar en detalles de fabricación.

Figura 1.5. Faro de Edystone



A Aspdin se le conoce como el inventor del cemento Pórtland, aunque su método de fabricación fue conservado con mucho secreto y su patente, escrita en forma confusa y oscura, solo se empleaba para producir ladrillo, con apariencia de las rocas de Pórtland.

La primera fábrica de cemento se instaló en Wakefield y funcionó entre 1826 y 1828, siendo luego demolida para dar paso a una vía férrea. De esa época se conserva un edificio, la fábrica de armas de Wakefield, muy cerca a la antigua fábrica de cemento, cuya fachada está confeccionada con cemento Pórtland.

La primera construcción en la cual se empleó en gran escala el concreto, fue la casa construida por Jhon Bazley White en Swanscombe, Kent, (1835). Allí se empleó en muros, tejas, marcos de ventanas, trabajos de decoración e incluso en gnomos de adorno en el jardín delantero. Lo único que no está construido en ese material es el entrepiso, puesto que aún no se conocía la técnica del concreto reforzado.

Curiosamente una construcción de la época empleó cemento Pórtland por accidente: un barco fue cargado con barriles conteniendo cemento, los cuales fueron saqueados por los habitantes de Sheppper, creyendo que contenían whisky y se encontraron con cemento que ya había endurecido, decidieron entonces emplearlo en la construcción de un edificio público: el "barco en la playa" (1848), el cual aún permanece.

El proceso de producción de cemento fue mejorado por Isaac Johnson en 1845 cuando logró con éxito fabricar este producto quemando una mezcla de caliza y arcilla hasta la formación del Clinker, el cual después fue pulverizado obteniendo un compuesto fuertemente cementante. Johnson encontró que la temperatura de calcinación debía elevarse hasta el máximo que pudiera lograrse con métodos de ese tiempo y describió sus experimentos más explícitamente que Aspdin.

Tomando como base los experimentos de Johnson, la fabricación de cemento Pórtland se inició en varias plantas, no solo en Inglaterra, sino también en toda Europa. La cantidad producida fue muy pequeña.

Únicamente hasta el año 1900 aproximadamente, empezó el crecimiento notable de la industria del cemento, debido fundamentalmente a dos factores: en primer lugar, los experimentos realizados por los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y por el alemán Michaélis, con los cuales se logró producir cemento de calidad uniforme, que pudiera ser usado en la industria de la construcción. En segundo lugar, dos invenciones mecánicas muy importantes se hicieron al principio del siglo: los hornos rotatorios para la calcinación y el molino tubular para la molienda. Con estas dos máquinas, pudo producirse el cemento Pórtland en cantidades comerciales. A partir de ese momento, se desarrolla el rápido crecimiento de esta industria, que hoy produce un material de construcción imprescindible, dentro del actual sistema de vida.

El desarrollo del concreto propiamente dicho como material de construcción, empezó hacia principios del siglo pasado, poco después de la obtención de la patente del "Cemento Pórtland" (1824) y posteriormente se afianzó con la invención del concreto reforzado que se atribuye al jardinero parisiense Jack Monier, quien, hacia 1861, fabricó un jarrón de mortero de cemento, reforzado con un enrejado de alambre.

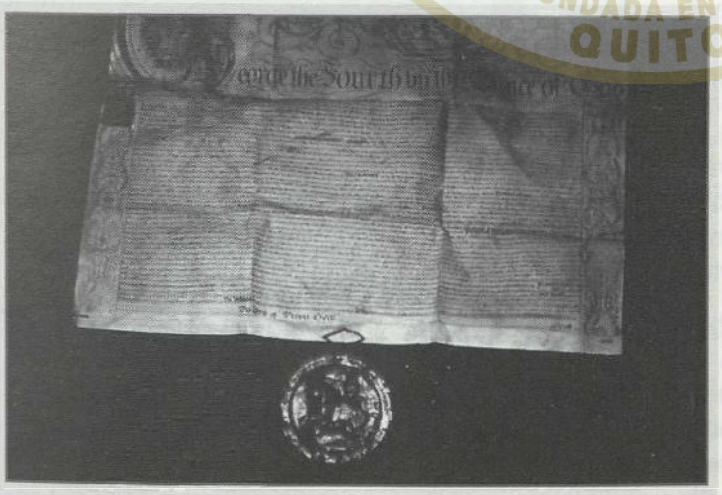


Figura 1.6. *Patente del cemento Portland*

Este material, se vino a conocer como ferrocemento, un siglo más tarde. La verdad, es que para entonces, ya se habían construido diversos objetos aplicando la misma idea, pero sin que tuvieran trascendencia en la industria de la construcción. Así por ejemplo Lambot construyó en 1850 una barca de cemento reforzada con hierro, que pudo verse en la Exposición Universal de París del año 1855 y que aún se exhibe en el Parque Miraval.

En 1861, el Ingeniero francés Coignet estableció normas para fabricar bóvedas, vigas, tubos, etc., con este novedoso material y presentó, asociado con Monier, algunos ejemplares en la exposición del año 1867. En este mismo año, Monier obtuvo sus primeras patentes para hacer estos elementos.

La primera referencia bibliográfica del uso de concreto reforzado aparece en 1830 en una publicación titulada "Enciclopedia de la arquitectura de casas de campo, granjas y aldeas", la cual sugiere emplear una malla de varillas de hierro embebidas en concreto, para conformar un techo. En 1848 despertó gran interés el primer bote del mundo en concreto reforzado, construido por el abogado francés Jean Louis Lambot, quien empleó una malla de varillas de hierro y concreto con agregado muy pequeño recubriéndola. Esta obra fue exhibida con éxito en la exposición de París de 1855.

Pero la persona a quien históricamente se le ha dado el mérito de haber desarrollado el concreto reforzado es el constructor William Wilkinson, de Newcastle, Inglaterra.

Concreto transportado

Un invento relativamente reciente, sucedido en 1903 en la ciudad de Hamburgo, Alemania, revolucionó el desarrollo de la industria del concreto y de la construcción, cuando el Ing. Juergen Hinrich Magens, hizo transportar el primer metro cúbico de concreto, producido en una planta mezcladora estacionaria, en un vehículo especial tirado por caballos hacia una obra distante 11 km. El inventor llamó al producto: concreto transportado y recibió el registro de la patente, por parte de la oficina alemana de patentes.

La idea de transportar una mezcla de agregados, pegante y agua, en estado fresco, hacia una obra fue planteada por el Ingeniero Inglés Deacon, quien vislumbró las ventajas que ello traería; pero los alemanes convirtieron la idea en un hecho.

El Ingeniero Magens inició ensayos en Hamburgo y con la tecnología tradicional de los albañiles residentes al norte de Berlín, quienes transportaban en vehículos halados por caballos, mortero premezclado de arena mojada con cal hidratada -como mortero de cal - hacia las obras dentro de la ciudad, desde hacía más de 20 años; y conociendo que el concreto no fragua a temperaturas por debajo de cero grados centígrados, inició sus experimentos y llegó a transportar concreto grandes distancias en ferrocarril y/o en carros de caballos, preparándolo y enfriándolo antes de transportarlo.

Poco después Magens descubrió que era posible obtener el mismo resultado, almacenando los agregados a bajas temperaturas o mediante la aplicación de agua fría, para hacerlos descender a una temperatura menor de la medio-ambiental y mantenerlos así durante cierto tiempo.

Por último en 1906, Magens descubrió que el concreto fresco, enfriado/ vibrado, permite un transporte más largo; y ese fue su invento más importante. El inventor consiguió por sus descubrimientos tres patentes, la última de ellas en enero 6 de 1907.

Posteriormente instaló 4 plantas mezcladoras de concreto, las primeras de todo el mundo, y tras de una intensa labor de convencimiento de la bondad de los principios del uso del concreto transportado, tanto al gobierno como a los industriales, el método fue empleado y los constructores empezaron a aprovechar el nuevo sistema.

Figura 1.7. Mezcladora de vapor y transporte halado por caballo en Estados Unidos (NRMCA, 1964). Fotografía tomada del libro "50 jaar betonmortelindustrie in Nederland 1948-1998" de VOBN.

SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Capítulo 2

Generalidades

Las propiedades de los constituyentes del concreto se expresan en cantidades físicas, tales como: la fuerza, el tiempo, la temperatura, la densidad entre otras. Muchos de estos términos, tales como la temperatura y el tiempo, hacen parte del vocabulario cotidiano, sin embargo expresados de esta manera pueden resultar insignificantes y no adquieren el alcance que tienen, cuando se trata de estimar las propiedades que determinan el comportamiento del concreto; caso en el cual se deben usar y definir con claridad y precisión.

Las unidades que se han utilizado para designar las cantidades físicas han variado de un lugar geográfico a otro, porque estaban asociadas a las características culturales de cada pueblo, sin embargo, durante el último siglo y como respuesta al avance que ha tenido el desarrollo en todos los campos, se han hecho esfuerzos para mejorar el entendimiento entre los científicos de todas las naciones y se ha adoptado el sistema internacional de unidades (abreviado con el símbolo SI), que se puede definir como "el conjunto sistemático y organizado de unidades adoptado por convención en el cual el producto o cociente de dos o más de sus magnitudes, da como resultado la unidad derivada correspondiente."

En alguna literatura sobre tecnología del concreto se han conservado unidades tales como la pulgada, el pie y la libra, en razón a que estas se utilizaban como unidades regionales hasta la década del 80 en los Estados Unidos y gran parte de los equipos utilizados para la producción y el control de calidad de concreto eran procedentes de este país. No obstante, en los Estados Unidos ya se inició el proceso de conversión al Sistema Internacional de Unidades y las normas que se están emitiendo, así como los equipos que se están produciendo trabajan con las unidades del sistema internacional (SI).

Por otra parte, en algunos países latinoamericanos es obligatorio utilizar el sistema internacional, los informes que tengan implicaciones contractuales deben ser preparados en este sistema. En los casos en que las unidades del sistema internacional no sean muy familiares, es recomendable escribir entre paréntesis el valor con las unidades que si lo sean. Ejemplo: 21 MPa (3000 psi).

La nomenclatura, definiciones y símbolos de las unidades del sistema internacional de unidades se presentan en la norma NTC 1000.

Patrones del sistema internacional de unidades

Las unidades de medida son el valor de una magnitud para la cual se admite, que su valor numérico es igual a uno (1) permiten hacer una comparación cuantitativa entre diferentes valores de una misma magnitud. Se acepta mundialmente que estas unidades de medida tengan un patrón que garantice que una medición sea igual en cualquier sitio. Como en el caso de la tecnología del concreto las magnitudes que más importan son la longitud, el tiempo y la masa; a continuación, se presenta una breve descripción de los patrones definidos para dichas magnitudes.

Patrón de longitud

El primer patrón internacional fue una barra de aleación Platino-Iridio conocida como metro patrón y conservada en la oficina internacional de pesas y medidas, cerca de París, Francia. Este metro se definió como la sustancia entre dos rayas trazadas sobre unos botones de oro cerca a los extremos de la barra. Como el metro patrón no era muy accesible, se hicieron copias maestras exactas de él y se mandaron a los laboratorios de normas de las diferentes naciones. Estos patrones secundarios se usaron para comparar otras barras todavía más accesibles, de tal forma que cada regla o calibrador derivaba su autoridad legal del metro patrón a través de una cadena larga y complicada. Posteriormente se adoptó la longitud de una onda de luz como patrón de longitud, de tal manera que la unidad de longitud se define como la distancia recorrida por una onda electromagnética plana en el vacío, en un intervalo de tiempo de 1/c segundos donde "c" es la velocidad de la luz en el vacío y corresponde a 299 792 458 m/s.

Patrón de tiempo

La medición del tiempo presenta dos aspectos diferentes: en la vida cotidiana interesa saber la hora del día para ordenar las actividades, mientras que en los laboratorios interesa conocer cuánto dura un fenómeno.

Cualquier fenómeno natural que se repita puede usarse para medir el tiempo, por ello desde tiempos antiguos se utilizó la rotación de la tierra al rededor de su eje o alrededor del sol. Posteriormente, los relojes de cristal de cuarzo, basados en la vibración natural periódica de una laminilla de cuarzo y en la actualidad los relojes atómicos basados en el átomo de cesio, con los cuales es posible definir el segundo como la duración de 9 192 631 770 períodos de la radiación correspondiente a la transición entre los dos niveles del estado fundamental del átomo de Cesio 133.

Patrón de masa

El patrón internacional adoptado es la masa de un prototipo de Platino-Iridio que se conserva desde 1889 en la oficina internacional de pesas y medidas cerca de París, Francia. Esta masa se definió y de ella se pueden hacer réplicas exactas que manejan los laboratorios de normas de las diferentes naciones.

En la tabla 2.1 se presentan las magnitudes utilizadas en el sistema internacional de unidades y en la tabla 2.2 se enumeran las unidades suplementarias y las aceptadas por este sistema.

Simbología técnica

- No se deben usar puntos después del símbolo de las unidades del Sistema Internacional. En los casos en que por regla de puntuación gramatical se deba colocar un signo de puntuación, éste se coloca dejando un espacio en blanco entre el símbolo y el respectivo signo. Ejemplo: kg , MPa , °C .
- Los símbolos nunca se pluralizan, siempre se escriben en singular porque ellos solamente representan la unidad. Ejemplo: 1 kg , 10 kg , 100 kg , etc. Sin embargo, cuando se escribe el nombre de una unidad en plural se debe hacer de acuerdo con las reglas de la gramática. Ejemplo: kilogramo- kilogramos, newton-newtons
- No se deben abreviar los nombres de las unidades, siempre se debe escribir el nombre completo o el símbolo correcto. Ejemplo: grs no corresponde a gramos, lo correcto es escribir gramos o g.

Tabla 2.1. Nombres de las magnitudes utilizadas en el sistema internacional de unidades

UNIDADES SI FUNDAMENTALES

MAGNITUD	UNIDAD	SÍMBOLO	DEFINICIÓN
Longitud	metro	m	Es la unidad SI de longitud
Masa	kilogramo	kg	Es la unidad SI de masa
Tiempo	segundo	s	Es la unidad SI de tiempo
Corriente eléctrica	ampere	A	Es la unidad SI de intensidad de corriente eléctrica
Temperatura termodinámica	kelvin	K	Es la unidad SI de temperatura termodinámica
Intensidad luminosa	candela	cd	Es la unidad SI de intensidad luminosa
Cantidad de sustancia	mol	mol	Es la unidad SI de cantidad de sustancia

UNIDADES SI DERIVADAS QUE NO TIENEN NOMBRE ESPECIALES

MAGNITUD	NOMBRE	SÍMBOLO
Superficie	metro cuadrado	m^2
Volumen	metro cúbico	m^3
Densidad	kilogramo por metro cúbico	kg/m^3
Velocidad	metro por segundo	m/s
Velocidad angular	radián por segundo	rad/s
Aceleración	metro por segundo cuadrado	m/s^2
Aceleración angular	radián por segundo cuadrado	rad/s^2

UNIDADES SI DERIVADAS QUE TIENEN NOMBRE ESPECIALES

MAGNITUD	UNIDAD	SÍMBOLO
Frecuencia	hertz	Hz
Fuerza	newton	N
Presión	pascal	Pa
Energía, trabajo, cantidad de calor	joule	J
Unidad de potencia	watt	W
Carga eléctrica	coulomb	C
Capacidad eléctrica	farad	F
Resistencia eléctrica	ohmio	Ω
Flujo luminoso	lumen	lm
Iluminancia	lux	lx

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
SIB - UCE

- No se debe combinar nombres y símbolos al expresar el nombre de una unidad derivada. Ejemplo: kilogramo/m^3 , lo correcto es kg/m^3 o kilogramo/metro cúbico.
- Todos los símbolos del sistema internacional de unidades se escriben en minúsculas, excepto aquellos que provienen del nombre de científicos. Ejemplo: kilogramo - kg , Pascal - Pa y Newton - N .
- Los símbolos deben estar separados un espacio en blanco de los valores numéricos. Ejemplo 21 MPa , 5 m , 5 g .
- Todo valor numérico debe expresarse con su unidad, incluso cuando se repite o cuando se especifica la tolerancia. Ejemplo: 24 h ± 4 h.
- El nombre completo de las unidades del Sistema Internacional de unidades se escribe con la letra minúscula, con la única excepción de grado Celsius, salvo al comenzar la frase o luego de un punto.

Tabla 2.2. Unidades suplementarias y aceptadas por el sistema internacional de unidades

UNIDADES SI SUPLEMENTARIAS

MAGNITUD	UNIDAD	SÍMBOLO	DEFINICIÓN
Ángulo plano	radián	rad	Es la unidad SI de ángulo plano
Ángulo solido	estereo-rradián	sr	Es la unidad SI de ángulo sólido

UNIDADES ACEPTADAS QUE NO PERTENECEN AL SI

MAGNITUD	UNIDAD	SÍMBOLO	DEFINICIÓN
Masa	tonelada	t	1t = 1000 kg
Tiempo	minuto	min	1min = 60 segundos
	hora	h	1h = 60 min = 3600 segundos
	día	d	1d = 24h = 86400 segundos
Temperatura	grado Celsius	°C	°C = K - 273,15 o K = °C + 273,15
Ángulo plano	grado	°	1° = (π/180) radianes
	minuto	′	1′= (1°/60) = (π/10800) radianes
	segundo	″	1″= (1′/60) = (π/648000) radianes
Volumen	litro	l o L	1 = 1dm^3 = 1 decímetro cúbico

Uso de la coma

La coma es reconocida como el signo ortográfico de escritura de los números, empleados en informes de laboratorio.

La ventaja de usar la coma para separar la parte entera de la parte decimal es muy grande ya que es más visible que un punto y por lo tanto no se pierde en el fotocopiado, ampliación o reducción de informes. Así mismo, se distingue mucho más fácilmente que un punto y no puede ser alterada, mientras que un punto puede ser transformado en coma.

CORRECTO	INCORRECTO
gramo	Gramo
newton	Newton
metro	Metro

Uso de los prefijos

Los prefijos se anteponen a los nombres o símbolos de las unidades para denotar los múltiplos o submúltiplos de las unidades, por ejemplo para indicar que se trata de 1000 gramos se antepone el prefijo kilo a la unidad gramo. Los prefijos que se usan en el sistema internacional de unidades se consignan en la tabla 2.3.

Todos los nombres de los prefijos del sistema internacional de unidades se escriben con letra minúscula. Ejemplo: kilo, mega, mili, micro.

Los símbolos de los prefijos para formar múltiplos se escriben con letra latina mayúscula, excepto el prefijo kilo, que por convención se escribe con letra (k) minúscula.

Tabla 2.3. Prefijos que se usan en el sistema internacional de unidades

MAGNITUD	SÍMBOLO	FACTOR	NOMBRE	SIMBOLO	FACTOR
exa	E	10^{18}	deci	d	10^{-1}
penta	P	10^{15}	centi	c	10^{-2}
tera	T	10^{12}	mili	m	10^{-3}
giga	G	10^{9}	micro	m	10^{-6}
mega	M	10^{6}	nano	n	10^{-9}
kilo	k	10^{3}	pico	p	10^{-12}
hecto	h	10^{2}	femto	f	10^{-15}
deca	da	10^{1}	atto	a	10^{-18}

Los símbolos de los prefijos para formar los submúltiplos se escriben con letra latina minúscula, excepto el símbolo del prefijo micro, para el cual se usa la letra μ (mu) minúscula del alfabeto griego.

No se debe usar dos o más prefijos delante del símbolo o nombre de la unidad de medida.

Es recomendable escoger los múltiplos y submúltiplos de las unidades de manera que los valores numéricos estén entre 1 y 1000.

La fecha se debe escribir en el orden siguiente: Año, mes, día utilizando un guión para separarlos.

Ejemplo:

1 de septiembre de 1995 95-09-01
5 de enero de 1996 96-01-05

Factores de conversión

- En las tablas 2.4 a la 2.11 se presentan las unidades más comunes en la tecnología del concreto y los factores para convertir de una unidad a otra. A continuación se indica la forma de usar estas tablas.
- Localice la columna con el nombre de la unidad que desea convertir.
- Dentro de esta columna identifique el renglón que tiene el número uno (1). Es la celda que está sombreada.
- Desplácese en el mismo renglón hasta encontrar la columna de la unidad a la que desea convertir. Este es el factor de conversión.
- Multiplique por este factor y el valor resultante estará en las unidades de esa columna.

En la tabla 2.12 se presenta la densidad de algunos compuestos utilizados frecuentemente en el control de calidad del concreto y sus constituyentes, en la tabla 2.13 se presenta un ejemplo de la magnitud de algunas propiedades de los agregados y en la tabla 2.14 del concreto.

Tabla 2.4. Factores de conversión de unidades de longitud

LONGITUD					
km	m	cm	mm	pie (ft)	pulgada (in)
1	1000	10^5	10^6	3281	$3,937 \times 10^7$
10^{-3}	1	100	1000	3,281	39,370
		1			
10^{-6}	10^{-3}	10	1	$3,281 \times 10^{-3}$	$3,937 \times 10^{-2}$
$3,048 \times 10^{-4}$	0,3048	30,48	304,8	1	12
$2,54 \times 10^{-5}$	0,0254	2,54	25,4	$2,778 \times 10^{-2}$	1

Ejemplo:

Para convertir pulgadas a metros, el factor de conversión es 0,0254 , de tal forma que al multiplicar pulgadas por 0,0254 se obtiene su equivalente en metros:

5 pulgadas (in) x 0,0254 m/pulgada (in) = 0,127 m

Para convertir pies a centímetros, el factor de conversión es 30,48 , de tal forma que al multiplicar pies por 30,48 se obtiene su equivalente en centímetros

3 pies (ft) x 30,48 cm/pies (ft) = 91,44 cm

Tabla 2.5. Factores de conversión de unidades de área

ÁREA					
km^2	m^2	cm^2	mm^2	pie^2 $(ft)^2$	$pulgada^2$ $(in)^2$
1	10^{-6}	10^{10}	10^{12}	$1,076 \times 10^{7}$	$1,550 \times 10^{9}$
10^{-6}	1	10^{4}	10^{6}	10,764	1550
10^{-10}	10^{-4}	1	100	$1,076 \times 10^{-3}$	0,1550
10^{-12}	10^{-6}	10^{-2}	1	$1,076 \times 10^{-5}$	$1,550 \times 10^{-3}$
$9,29 \times 10^{-8}$	$9,29 \times 10^{-2}$	929	92900	1	144
$6,45 \times 10^{-10}$	$6,45 \times 10^{-4}$	6,4516	645,16	$6,944 \times 10^{-3}$	1

Ejemplo:

Para convertir pulgadas cuadradas (in^2) a centímetros cuadrados, el factor de conversión es 6,4516, de tal forma que al multiplicar pulgadas cuadradas por 6,4516 se obtiene su equivalente en centímetros cuadrados:

25 $pulgada^2$ (in^2) x 6,4516 $cm^2/pulgada^2$ (in^2)= 161,29 cm^2

Para convertir centímetros cuadrados a pies cuadrados, el factor de conversión es $1,076 \times 10^{-3}$, de tal forma que al multiplicar centímetros cuadrados por 1,076 x 10-3 se obtiene su equivalente en pies cuadrados.

5 000 cm^2 x 1,076 x 10-3 pie^2 (ft^2)/cm^2 = 5,38 pie^2 (ft^2)

Tabla 2.6. Factores de conversión de unidades de volumen

VOLUMEN					
m^3	dm^3 (l)	cm^3 (ml)	pie^3 (ft^3)	Galón*	$pulgada^3$ (in^3)
1	10^{-3}	10^{6}	35,311	264,17	6102
10^{-3}	1	10^{3}	$3,531 \times 10^{-2}$	0,2642	61,02
10^{-6}	10^{-3}	1	$3,531 \times 10^{-5}$	$2,642 \times 10^{4}$	$6,102 \times 10$
$2,832 \times 10^{-2}$	28,32	$2,832 \times 10^{-4}$	1	7,481	1728
$3,788 \times 10^{-3}$	3,785	$3,785 \times 10^{3}$	0,1337	1	231
$1,639 \times 10^{-5}$	$1,639 \times 10^{-2}$	16,387	$5,787 \times 10^{-4}$	$4,329 \times 10^{-3}$	1*

* Galón americano

Ejemplo:

Para convertir pies cúbicos a decímetros cúbicos (Litros) , el factor de conversión es 28,32 , de tal forma que al multiplicar pies cúbicos por 28,32 se obtiene su equivalente en decímetros cúbicos:

0,5 pie^3 (ft^3) x 28,32 dm^3/pie^3 (ft^3) = 14,16 dm^3 (l)

Para convertir litros a metros cúbicos, el factor de conversión es 10^{-3}, de tal forma que al multiplicar litros por 10^{-3} se obtiene su equivalente en metros cúbicos.

5 000 l x 10^{-3} m^3/l = 5 m^3

Tabla 2.7. Factores de conversión de unidades de masa

MASA			
tonelada	kg	g	lb
1	1000	10^6	$2{,}205 \times 10^3$
10^{-3}	1	1000	2,2046
10^{-6}	10^{-3}	1	$2{,}204 \times 10^{-3}$
$4{,}536 \times 10^{-4}$	0,4536	453,6	1

Ejemplo:

Para convertir libras a kilogramos, el factor de conversión es 0,4536, de tal forma que al multiplicar libras por 0,4536 se obtiene su equivalente en kilogramos:

5 lb x 0,4536 kg/lb = 2,268 kg

Para convertir toneladas a libras, el factor de conversión es $2{,}204 \times 10^3$, de tal forma que al multiplicar toneladas por $2{,}204 \times 10^3$ se obtiene su equivalente en libras.

0,5 t x $2{,}204 \times 10^3$ lb/t = 1 102 lb

Tabla 2.8. Factores de conversión de unidades de densidad

DENSIDAD			
t/m^3 g/cm^3	kg/m^3	lb/pulgadas^3 (in^3)	lb/pie^3 (ft^3)
1	1000	0,03613	62,43
10^{-3}	1	$3{,}613 \times 10^{-5}$	$6{,}243 \times 10^{-2}$
27,680	27680	1	$1{,}728 \times 10^3$
$1{,}602 \times 10^{-2}$	16,019	$5{,}787 \times 10^{-4}$	1

Ejemplo:

Para convertir libras por pulgada cúbica a tonelada por metro cúbico (o g/cm^3) , el factor de conversión es 27,68 , de tal forma que al multiplicar libras por pulgada cúbica por 27,68 se obtiene su equivalente en tonelada por metro cúbico:

0,55 lb/pulgada^3 (in^3) x 27,68 (t/m^3)/(lb/pulgada3 (in^3)) = 15,224 t/m^3

Para convertir libras por pie cúbico a kilogramos por metro cúbico, el factor de conversión es 16,019, de tal forma que al multiplicar libras por pie cúbico por 16,019 se obtiene su equivalente en kilogramos por metro cúbico.

150 lb/pie^3 (ft^3) x 16,019 (kg/m^3)/(lb/pie^3 (ft^3)) = 2 402,85 kg/m^3

Tabla 2.9. Factores de conversión de unidades de fuerza

FUERZA				
kN	N	kg_f	ton_f	lb_f
1	10^3	101,96	0,1004	224,82
10^{-3}	1	0,10196	$1,004 \times 10^{-4}$	0,2248
$9,807 \times 10^{-3}$	9,807	1	$9,842 \times 10^{-4}$	2,2048
9,964	9964	1016	1	2240
$4,448 \times 10^{-3}$	4,448	0,45455	$4,464 \times 10^{-4}$	1

Ejemplo:

Para convertir libras fuerza a kilonewtons, el factor de conversión es $4,448 \times 10^{-3}$, de tal forma que al multiplicar libras fuerza por $4,448 \times 10^{-3}$ se obtiene su equivalente en kilonewtons:

$$1\,500\ lb_f \times 4,448 \times 10^{-3}\ (kN)/(lb_f) = 6,672\ kN$$

Para convertir kilogramos fuerza a newtons, el factor de conversión es 9,807 , de tal forma que al multiplicar kilogramos fuerza por 9,807 se obtiene su equivalente en newtons.

$$500\ kg_f \times 9.807\ (N)/(kg_f) = 4\,903,5\ N$$

Tabla 2.10. Factores de conversión de unidades de esfuerzo

ESFUERZO				
N/mm^2 MPa	kN/m^2 kPa	kp kg_f/cm^2	bar	psi lb_f/pulgada^2 (in^2)
1	1000	10,197	10	145,04
0,001	1	$0,109 \times 10^{-2}$	0,0100	0,14504
$9,807 \times 10^{-2}$	98,07	1	0,9807	14,223
0,100	100	1,0197	1	14,504
$6,895 \times 10^{-3}$	6,895	$7,031 \times 10^{-2}$	$6,895 \times 10^{-2}$	1

Ejemplo:

Para convertir libras fuerza por pulgada cuadrada a megapascales, el factor de conversión es $6,865 \times 10^{-3}$, de tal forma que al multiplicar libras fuerza por pulgada cuadrada por $6,895 \times 10^{-3}$ se obtiene su equivalente en megapascales:

$$3040\ psi \times 6,895 \times 10^{-3}\ (MPa)/(psi) = 21\ MPa$$

Para convertir kilogramos fuerza por centímetro cuadrado a megapascales, el factor de conversión es $9,807 \times 10^{-2}$, de tal forma que al multiplicar kilogramos fuerza por centímetro cuadrado por 9,807 x 10-2 se obtiene su equivalente en megapascales.

$$214\ kg_f/cm^2 \times 9.807 \times 10^{-2}\ (MPa)/(kg_f/cm^2) = 21\ MPa$$

Tabla 2.11. Factores de conversión de unidades de permeabilidad

PERMEABILIDAD					
m/s	cm/s	m/año	darcy	pie (ft)/año	pie (ft)/día
1	100	$3,156 \times 10^{7}$	$1,04 \times 10^{5}$	$1,035 \times 10^{8}$	$2,835 \times 10^{5}$
0,01	1	$3,156 \times 10^{5}$	$1,04 \times 10^{3}$	$1,035 \times 10^{6}$	$2,834 \times 10^{3}$
$3,169 \times 10^{-8}$	$3,169 \times 10^{-6}$	1	$3,28 \times 10^{3}$	3,281	$8,982 \times 10^{-3}$
$9,66 \times 10^{-6}$	$9,66 \times 10^{-4}$	304	1	1000	2,74
$9,658 \times 10^{-9}$	$9,659 \times 10^{-7}$	0,3048	10^{-3}	1	$2,738 \times 10^{-3}$
$3,527 \times 10^{-6}$	$3,527 \times 10^{-4}$	111,33	0,365	365,25	1

Tabla 2.12. Densidad de compuestos utilizados para el control de calidad del concreto

ALGUNAS DENSIDADES (g/cm³) a 20 °C	
Agua pura	0,99820
Agua marina	1,04
Kerosene (aprox)	0,80
Mercurio	13,546

Tabla 2.13. Ejemplo de la magnitud de algunas propiedades de los agregados

AGREGADO GRUESO	
Absorción	3%
Densidad aparente	2,48 g/cm³
Desgaste en máquina de los angeles	27%
Masa unitaria	1400 kg/m³
Pasa tamiz 75 µm	2%
Tamaño máximo	25 mm
AGREGADO FINO	
Contenido de materia orgánica	2
Densidad aparente	2,63 g/cm³
Masa unitaria	1400 kg/m³
Módulo de finura	3,15

Tabla 2.14. Ejemplo de la magnitud de algunas propiedades del concreto

PROPIEDADES DEL CONCRETO	
Asentamiento	10 mm
Tempertura	27 °C
Masa unitaria	2400 kg/m³
Contenido de aire	2%
Resistencia a la compresión	21 MPa
Módulo de flexión	5,5 MPa
Módulo de elasticidad	27580 MPa

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST QUI MELIUS SCIENTIAM
FUNDADA EN 1620
QUITO

CEMENTO PÓRTLAND

Capítulo 3

Generalidades

El avance que ha tenido en el último siglo la tecnología permite contar con varias clases de cemento, las cuales están diseñadas para proporcionar propiedades adecuadas para la producción de los diferentes tipos de concreto. Es por esto que se hace necesario conocer y manejar sus bondades en beneficio de obtener mezclas económicas y de buen desempeño.

Definición

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, formado un todo compacto. En la construcción, se ha generalizado la utilización de la palabra cemento para designar un tipo de aglutinante específico que se denomina Cemento Pórtland, debido a que es el más común.

El cemento Pórtland es la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. El nombre obedece a la similitud en el aspecto del cemento endurecido con una piedra que abunda en Pórtland, Inglaterra. Fue patentado en 1824 por Joseph Aspdin con un proceso que fue perfeccionado algunos años más tarde por Isaac Johnson.

Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia del agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación.

Proceso de fabricación

En general el cemento Pórtland se fabrica a partir de materiales minerales calcáreos tales como la caliza y materiales arcillosos con alto contenido de alúmina y sílice. Frecuentemente es necesario adicionar otros productos, como óxido de hierro, para mejorar la composición química de las materias primas principales.

La proporción en que debe mezclarse la caliza con la arcilla depende de la composición de los materiales. Debido a que la cantidad de caliza es generalmente 4 veces mayor a la de arcilla, el primer paso a seguir, para seleccionar la localización de una fábrica de cemento, es estudiar los depósitos de caliza y luego proceder a encontrar las fuentes de arcilla cercanas.

Existen diferentes tipos de caliza que varían en apariencia y dureza, pero prácticamente todas pueden utilizarse en la manufactura de cemento. El único caso en que no pueden ser empleadas, es cuando tienen cantidades grandes de magnesio, pues si el cemento contiene más del límite permitido, se presentarán cambios volumétricos en la pasta de cemento endurecida, que ocasionarán fisuramiento y desmejoramiento de las propiedades mecánicas.

Las materias primas se deben moler finamente, mezclar minuciosamente en una cierta proporción y calcinar en un horno rotatorio a una temperatura de aproximadamente 1400 °C,

allí el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando el clinker. Este se enfría y se tritura hasta obtener un polvo fino el cual es mezclado con yeso para obtener como producto final el cemento Pórtland.

En algunos casos además de yeso, se suman otros materiales con características especiales, formando así los cementos adicionados, de uso muy común en la construcción.

El proceso de fabricación empleado en determinada planta productora de cemento varía de acuerdo con sus circunstancias particulares, pero en general todas realizan las siguientes etapas:

- Explotación de materias primas
- Dosificación, molienda y homogeneización de materias primas
- Clinkerización
- Enfriamiento
- Molienda de Clinker, adiciones y yeso
- Empaque y distribución

Los detalles del proceso de fabricación del cemento, se explican a continuación en la figura 3.1.

Explotación de materias primas

El procedimiento de explotación se hace de acuerdo a las normas y parámetros convencionales. Dependiendo de la dureza de los materiales se usan explosivos y trituración posterior, en otros casos el simple arrastre es suficiente.

Una vez extraídos los materiales de las respectivas canteras, se lleva a un proceso de trituración primaria para obtener tamaños máximos de 25 mm (1"). Los materiales que no requieren de esta trituración se llevan a un lugar de almacenamiento.

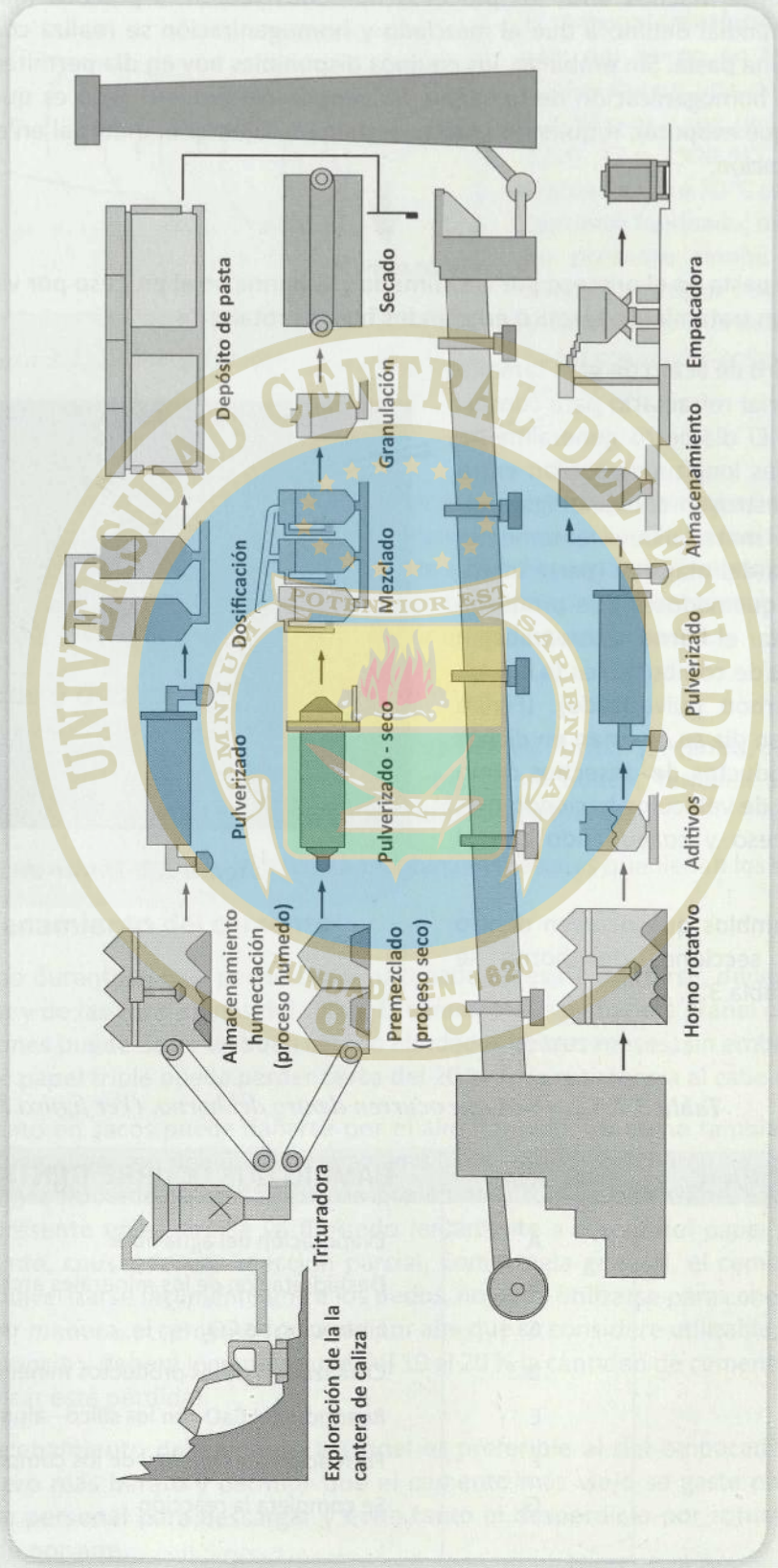
Dosificación, molienda y homogeneización

Este paso se puede efectuar con materiales suspendidos en agua, con los materiales secos o con distintos grados de humedad.

- ***Proceso húmedo:*** Las materias primas se llevan a los molinos (denominados molinos de crudo), donde son mojados y se obtiene una lechada, la cual se lleva a silos de almacenamiento (llamados silos de crudo), donde una vez conocidas sus características químicas se dosifican en proporciones definidas y se envían a un silo de normalización. En este lugar se hacen las correcciones necesarias para obtener la pasta de la calidad deseada. Una vez normalizada se transporta a un tanque circular denominado « balsa» donde se almacena y se mantiene la homogeneidad.
- ***Proceso seco:*** Las materias primas se trituran, se dosifican en proporciones definidas y son llevadas al molino de crudo donde se secan y reducen su tamaño a pequeñas partículas, obteniéndose un material denominado harina, el cual se lleva a los silos de homogeneización, y allí por medio de aire a presión se obtiene la mezcla de los materiales.

B 5135950

Figura 3.1. *Etapas en la fabricación del Cemento Pórtland*



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
SIB - UCE

La utilización del procedimiento húmedo o seco depende de muchos factores físicos y económicos. Durante muchos años los procesos húmedos fueron la práctica más empleada a nivel mundial debido a que el mezclado y homogenización se realiza con mayor facilidad en una pasta. Sin embargo, los equipos disponibles hoy en día permiten obtener una buena homogenización de la harina. La ventaja del proceso seco es que por no tener agua que evaporar, requiere menor energía para calentar el material en el proceso de clinkerización.

Clinkerización

Una vez obtenida la pasta en el proceso por vía húmeda y la harina en el proceso por vía seca se someten a un tratamiento térmico en grandes hornos rotatorios.

El horno es un cilindro de acero de gran tamaño recubierto de material refractario para conservar mejor el calor. El diámetro generalmente es mayor a 4 m y las longitudes oscilan entre 60 y 150 m. Se construyen con una ligera inclinación para que el material fluya lentamente. En la zona de salida del material (parte inferior), se colocan los quemadores que producen la llama para calentar el horno, éstos trabajan con diferentes tipos de combustibles (a.c.p.m., gasolina, gas y carbón pulverizado). (Figura 3.2). Inclusive hoy en día se queman en dichos hornos algunos productos de desechos como por ejemplo llantas de vehículos haciendo más económico el proceso y coayudando con el medio ambiente.

Figura 3.2. Horno de cemento

La secuencia de cambios que ocurren dentro de las diferentes secciones del horno se esquematiza en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Cambios que ocurren dentro del horno. (Ver figura 3.3)

TEMPERATURA °C	ZONA	CAMBIO QUE OCURRE DENTRO DEL HORNO
20 - 100	A	Evaporación del agua libre
> 500	B	Deshidratación de los minerales arcillosos
800	C	Liberación de CO_2
900	D	Critalización de los productos minerales descompuestos
900 - 1200	E	Reacción del CaO con los sílico - aluminatos
> 1250	F	Formación del liquido y de los compuestos del cemento
1450	G	Se completa la reacción

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

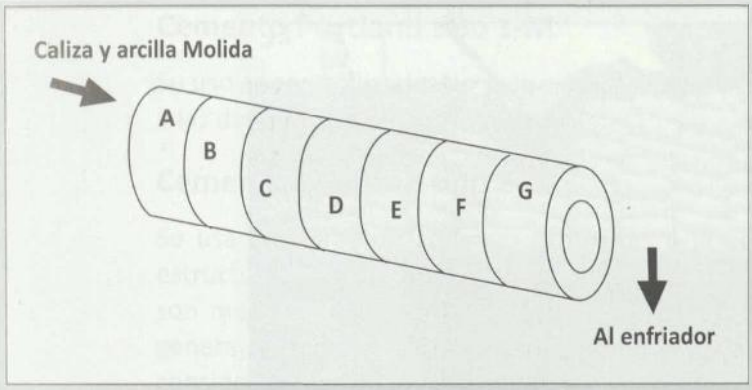


Figura 3.3. Zonas del horno

Enfriamiento

El material transformado en clinker (que sale del horno en forma de bolas, las cuales tienen una dimensión que va de 3 a 30 mm y con una temperatura entre 1200 °C y 1300 °C), debe ser enfriado rápidamente a 70 °C para garantizar que el cemento fabricado, después de fraguado, no presente cambio de volumen. Los diferentes tipos de enfriadores que existen en el mercado tienen en común hacer pasar corrientes de aire frío a través del clinker.

Molienda de clinker, adiciones y yeso

Durante este proceso se transforma el clinker en polvo y se agregan las adiciones (por ejemplo, puzolanas naturales o artificiales, cenizas volantes o escoria de alto horno). Luego, se introduce el yeso y así se hace el cemento propiamente dicho. El yeso es indispensable para controlar el endurecimiento del cemento una vez entra en contacto con el agua, porque cuando su cantidad es muy baja el endurecimiento puede ocurrir de manera instantánea.

Empaque y distribución

El cemento resultante del molino se transporta en forma mecánica o neumática a silos de almacenamiento y posteriormente se empaca en bultos. También se puede descargar directamente en carros cisternas para su distribución a granel.

La operación de empacado se hace en máquinas especiales que llenan los sacos.

Almacenamiento del cemento

El tiempo durante el cual puede ser almacenado antes de utilizarse, depende principalmente del lugar y de las condiciones del clima. El cemento almacenado a granel en un silo en buenas condiciones puede durar en buen estado alrededor de tres meses, sin embargo, el cemento en sacos de papel triple puede perder cerca del 20 % de la resistencia al cabo de 4 ó 6 semanas.

El cemento en sacos puede dañarse por el aire húmedo, así como también por la exposición directa con el agua o debido a un almacenamiento prolongado o en arrumes muy altos o en condiciones húmedas donde se puede presentar el fraguado por aire. Este ocurre cuando el vapor presente en el aire se va filtrando lentamente a través del papel y es absorbido por el cemento, causando una reacción parcial. Como regla general, el cemento grueso que no puede pulverizarse fácilmente entre los dedos, no debe utilizarse para concreto estructural. De cualquier manera, el cemento fraguado por aire que se considere utilizable, habrá perdido algo de resistencia y deberá incrementarse del 10 al 20 % la cantidad de cemento en la mezcla, para compensar esta pérdida.

El almacenamiento del cemento a granel es preferible al del empacado en sacos, por ser el primero más barato y permitir que el cemento más viejo se gaste primero, además, no requiere personal para descargar y evita tanto el desperdicio por rotura de sacos como el fraguado por aire.

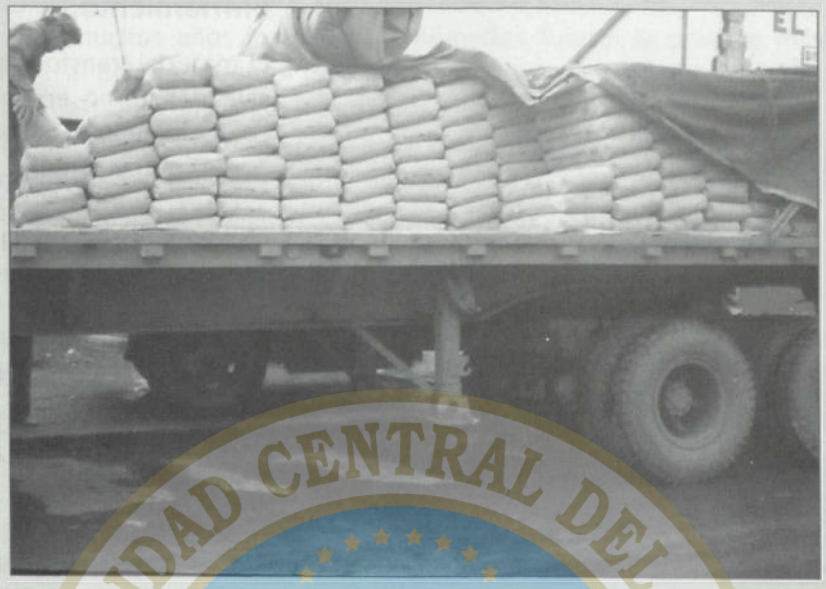


Figura 3.4. Cemento en bultos

Clasificación del cemento Pórtland

Hoy en día se fabrican diversos tipos de cemento para satisfacer diferentes necesidades y para cumplir con propósitos específicos. La norma NTC 30 estipula once clases de cemento que tienen la siguiente nomenclatura:

- Pórtland tipo 1 — Normal
- Pórtland tipo 1-A — Normal inclusor de aire
- Pórtland tipo 1-M — Normal de mayores resistencias
- Pórtland tipo 1-M A — Normal de mayores resistencias, inclusor de aire
- Pórtland tipo 2 — De resistencia moderada a los sulfatos
- Pórtland tipo 2-A — De resistencia moderada a los sulfatos, inclusor de aire
- Pórtland tipo 3 — De alta resistencia inicial
- Pórtland tipo 3-A — De alta resistencia inicial, inclusor de aire
- Pórtland tipo 4 — De bajo calor de hidratación
- Pórtland tipo 5 — De resistencia elevada a los sulfatos
- Pórtland blanco — Color blanco, normalmente tipo 1 ó 3

Cemento Pórtland tipo 1

De uso general, destinado a obras de concreto que no estén sujetas al contacto de factores agresivos, como el ataque de sulfatos existes en el suelo o el agua, o a concretos que tengan un aumento cuestionable de la temperatura debido al calor generado durante la hidratación. Entre sus usos se incluyen: pavimentos, pisos, edificios de concreto reforzado, puentes, estructuras para vías férreas, tanques y depósitos, tubería, mampostería y otros productos de concreto reforzado.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620 QUITO

Cemento Pórtland tipo 1-M

Su uso es generalizado. No se le exige propiedades especiales, pero tiene resistencias superiores a las del tipo 1.

Cemento Pórtland tipo 2

Se usa en obras de concreto expuestas a la acción moderada de sulfatos, como ocurre en estructuras enterradas en zonas donde las concentraciones de éstos, en las aguas freáticas, son mayores de lo normal, aunque no son demasiado severas (ver tabla 3.2). Este cemento genera moderado calor de hidratación, lo que lo hace adecuado para estructuras de volumen considerable, como en pilas de gran masa, estribos grandes y muros de contención. Su empleo reducirá el aumento de la temperatura, hecho muy importante al fundir concreto en climas cálidos.

El ataque de los sulfatos ocurre porque uno de los componentes del cemento, denominado aluminato tricálcico (C_3A), reacciona químicamente con los sulfatos presentes en el medio ambiente formando un compuesto de mayor volumen, llamado sulfoaluminato de calcio, el cual por ocupar más espacio, origina esfuerzos internos en la pasta de cemento que pueden llegar a desintegrarla.

Cemento Pórtland tipo 3

Desarrolla altas resistencias a edades tempranas, normalmente a una semana o menos. Su composición química difiere de un cemento tipo 1, pero físicamente es similar al cemento Pórtland tipo 1, excepto que sus partículas han sido molidas más finamente. Se emplea cuando las formaletas deben ser removidas rápidamente o cuando se tenga que poner la estructura en servicio pronto.

Cemento Pórtland tipo 4

Se recomienda para mantener al mínimo la velocidad y cantidad del calor de hidratación. Desarrolla resistencia a una velocidad muy inferior a la de otros tipos. Se usa para estructuras de concreto masivo, como presas de gravedad grandes, donde el aumento de temperatura resultante en el transcurso del endurecimiento se tenga que conservar en el menor valor posible.

Cemento Pórtland tipo 5

Ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos y se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de éstos, especialmente donde los suelos o aguas freáticas tengan alto contenido de sulfato. Su resistencia se adquiere más lentamente que la de un cemento tipo 1. La tabla 3.2 describe las concentraciones de sulfatos en que es necesario usar cemento Pórtland tipo 5. Este tipo al igual que los demás, no resiste el ataque de soluciones ácidas, ni de otras sustancias altamente corrosivas.

Cemento Pórtland blanco

Se obtiene con materiales que le confieren una coloración blanca, de tal forma que sólo difiere del cemento Pórtland por su color. Se produce con materias primas que contienen cantidades insignificantes de óxidos de hierro y manganeso, las cuales le dan el color gris. Se utiliza principalmente para la elaboración de concretos arquitectónicos.

Tabla 3.2. Tipos de cemento necesario para concreto expuesto a la acción de sulfatos (13)

Expocisión a los sulfatos	Pocentaje de sulfatos en el suelo solubles en agua (%)	Sulfatos en el agua (ppm)	Tipo de cementos
Despreciable	0,00 - 0,10	0 - 150	1,2,3,4,5
Moderada*	0,10 - 0,20	150 - 1500	2
Sevea	0,20 - 0,00	1500 - 10000	5
Muy severa	> 2,00	> 10000	5 + puzolanas**

* Agua de mar

** Puzolana que haya demostrado por pruebas mejoras en la resistencia a los sulfatos cuando se utilice en un concreto que contenga cemento Pórtland tipo 5.

Cemento Pórtland con incorporadores de aire

Los cementos Pórtland tipo 1-A, 2-A y 3-A son adicionados con un material incorporador de aire durante el proceso de fabricación, de tal manera que su composición corresponde a los tipos 1, 2 y 3, respectivamente. Estos cementos producen concretos con resistencias mejoradas contra la acción del congelamiento-deshielo.

Figura 3.5. Edificaciones en concreto blanco.

Cementos Pórtland adicionados

Además de los anteriormente mencionados, es frecuente el uso de cementos a base de clinker Pórtland adicionado con una proporción de otro material, que aunque no tenga propiedades aglomerantes por sí mismo, las desarrolla cuando se mezcla con este. Los principales materiales de adición son: escorias de alto horno molidas, cenizas volantes y otras puzolanas, cal hidratada y combinaciones previamente mezcladas de cemento con estos materiales. El polvo de horno del cemento, al igual que el humo de sílice y otros materiales se encuentran actualmente sujetos a investigación para ser empleados en estos cementos. Dentro de estos se encuentran los siguientes:

- Cemento Pórtland de escoria de alto horno
- Cemento Pórtland puzolánico
- Cemento Pórtland con adiciones

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Cemento Pórtland de escoria de alto horno

Este tipo de cemento se puede emplear en las construcciones de concreto en general, de acuerdo con la norma NTC31. Se obtiene mediante la pulverización conjunta de clinker Pórtland y escoria granulada finamente molida, con adición de sulfato de calcio (yeso). El contenido de escoria granulada de alto horno, debe estar comprendido entre 15% y 85%, de la masa total.

Al producirlo existen tres opciones: en una la escoria de alto horno granulada se muele junto con el clinker de cemento Pórtland; en la segunda se tritura separadamente y luego se mezcla con el cemento Pórtland; en la última manera se obtiene por una combinación de molienda y mezclado.

Cemento Pórtland Puzolánico

Se emplea en la construcción de obras específicas en que hay que considerar aspectos como la durabilidad, estabilidad, calor de hidratación, plasticidad, etc., y en aquellas en los que los cementos Pórtland ordinarios manifiestan alguna insuficiencia. Según se indica en la norma NTC31, se puede obtener mediante la pulverización conjunta de clinker Pórtland y puzolana, o mediante una mezcla íntima y uniforme de los dos, con adición de sulfato de calcio. El contenido de puzolana debe estar comprendido entre el 15% y el 50%, en masa de la total.

En general, se consideran como puzolanas los materiales eminentemente sílico-aluminosos, naturales o artificiales que, al carecer de actividad hidráulica y de propiedades cementantes por sí solos, contienen constituyentes que a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, se combinan con el hidróxido de calcio para formar compuestos permanentemente insolubles en agua y estables, los cuales se comportan como conglomerantes hidráulicos.

Las puzolanas, según su origen se pueden clasificar de la siguiente manera:

- ***Naturales:*** son aquellas que tienen por sí mismas carácter puzolánico, y estas divididas en:
  - ***Origen orgánico sedimentario:***
    - Vegetal: como las tierras formadas por esqueletos de plantas (algas diatomeas)
    - Animal: formadas por caparazones animales (tierra de infusorios).

- ***Artificiales:*** son aquellas que resultan de tratamientos térmicos de activación y se dividen en:

  - Ciertas rocas no reactivas en estado natural pueden activarse gracias a un tratamiento térmico entre 600 °C y 900 °C; generalmente de carácter arcilloso.
  - Subproductos industriales obtenidos, entre otros, en los procesos de fabricación de aluminio y durante la combustión del carbón en las centrales térmicas.

Intermedias: son aquellas puzolanas naturales, que al igual que las artificiales, se someten a tratamientos térmicos de «ennoblecimiento» para incrementar su acción.

Las causas de la actividad de las puzolanas parece que tienen que ver con su constitución y estructura interna, y ésta será mayor cuanto más vítrea o amorfa y menos cristalina sea.

La estructura vítrea-amorfa suele ser típica de las puzolanas naturales a causa del enfriamiento súbito del magma de lava volcánica.

Los efectos causados en la red cristalina son consecuencia del tratamiento térmico de las puzolanas artificiales y de la meteorización de las naturales. La gran superficie específica puede ser natural, debido a un alto grado de subdivisión o producida en la molienda.

Como se puede observar, los cementos con puzolanas, por las características particulares que le confieren éstas, tienen propiedades que los diferencian de los Pórtland. Dichas diferencias hacen que tengan campos específicos de aplicación, dentro de determinados aspectos, en los cuales pueden sustituir a los Pórtland, incluso con ventajas, siendo mejores que estos.

El presente de estos cementos es brillante y parece ser que lo será aún más en su porvenir, ya que a las ventajas técnicas se unen las ventajas económicas del ahorro de combustible en su fabricación. Dentro de los beneficios que pueden derivarse del empleo de éstos cementos se encuentran los siguientes:

- Una economía en el costo del conglomerante, mejor trabajabilidad, menor segregación y menor exudación (sangrado).
- Menor calor de hidratación y fraguado (fragüe) y una consiguiente menor tendencia a la fisuración (agrietamiento).
- Mayor resistencia a la compresión a edades avanzadas.
- Mayor valor de la relación tracción/compresión, sobre todo a corto plazo.
- Mayor resistencia en general a largo plazo.
- Menor permeabilidad.
- Mayor durabilidad en general frente a ataque de sulfatos y a la reacción expansiva álcali/agregado.

Cemento Pórtland con adiciones

De acuerdo a la definición dada por la norma NTC31, es el producto que se obtiene de la pulverización conjunta de clinker Pórtland y otros materiales arcillosos, calcáreo-sílico-aluminosos, calcinados o no, que poseen propiedades hidráulicas o puzolánicas.

Otros cementos

Otros cementos que tienen alguna importancia por su utilidad dentro del medio de la construcción, son los siguientes:

Cemento de mampostería

Es el material que se obtiene por la pulverización conjunta de clinker Pórtland y los materiales que carezcan de las propiedades hidráulicas o puzolánicas, junto con la adición de sulfato de calcio. El contenido de materiales adicionales debe estar comprendido entre el 15% y 50%, de la masa total. Estos cementos están clasificados en la norma NTC 4050 y por ser diseñados para emplearse en morteros destinados a la construcción de mampostería, nunca deben emplearse en la elaboración de concreto estructural.

Cemento aluminoso

Este componente se consigue por la pulverización del clinker aluminoso, el cual está constituido en su mayor parte por aluminato de calcio, logrando la fusión de una mezcla convenientemente

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM SCIENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

proporcionada y homogenizada de materiales seleccionados siempre y cuando en el clinker resulte la cantidad de óxido de aluminio superior al 30% y la de óxido de hierro inferior al 20%, expresados ambos porcentajes en masa de la total.

Propiedades del cemento

El estudio de las propiedades del cemento, permite conocer algunos aspectos de su bondad como material cementante. Estas propiedades son de carácter químico, físico y mecánico y dependen del estado en el cual se encuentren.

Propiedades químicas

El proceso de clinkerización del cemento involucra la transformación de las materias primas a productos más complejos, por medio de reacciones en estado sólido. Razón por la cual, la química del cemento frecuentemente emplea un modelo basado en abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes, tal como se ilustra en la tabla 3.3. Los cuatro compuestos principales del cemento se forman a partir de estos óxidos, son los que se enumeran en la tabla 3.4.

Estos compuestos se forman en el interior del horno cuando la temperatura alcanza el punto en que la mezcla cruda se transforma en un líquido pastoso, que al enfriarse da origen a sustancias cristalinas de los primeros compuestos citados, rodeados por un material intersticial que contiene C_4AF y otros elementos secundarios.

Tabla 3.3. Abreviaturas de los óxidos del cemento (13)

FÓRMULA	NOMBRE	ABREVIATURA
CaO	Oxido de Calcio "Cal"	A
SiO_2	Dióxido de Sílice "Sílicato"	S
Al_2O_3	Oxido de Aluminio "Aluminato"	A
Fe_2O_3	Oxido de Hierro "Hierro"	F

Tabla 3.4. Compuestos principales del cemento (13)

NOMBRE	ABREVIATURA
Sílicato tricálcico	C_3S
Sílicato didálcico	C_2S
Aluminato tricálcico	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	C_4Af

Estas composiciones, llamadas potenciales, no se presentan aisladas. Se puede hablar de «fases,» que las contienen en una gran proporción junto con algunas impurezas, por lo cual no son verdaderos compuestos en el sentido químico, pero las proporciones calculadas de ellos revelan valiosa información, en cuanto a las propiedades del cemento.

De esta forma se habla de la fases: alita, con alto contenido de C_3S, la belita, a base de C_2S, la aluminato, rica en C_3A y la ferrito, solución sólida compuesta por ferritos y aluminatos de calcio.

La alita (C_3S) es la fase principal de la mayoría de los clinkers Pórtland, y de ella dependen en buena parte las características de desarrollo de resistencia mecánica; el C_3S reacciona rápidamente con el agua, endurece en corto tiempo y tiene alto calor de hidratación, de tal manera, que afecta el tiempo de fraguado (fragüe) y la resistencia inicial.

La belita es usualmente la segunda fase en importancia del clinker y su componente principal es el C_2S, éste reacciona lentamente con el agua, con un consecuente bajo calor de hidratación y una contribución al desarrollo de la resistencia a partir de siete días.

La figura 3.6. muestra esquemáticamente la contribución de los componentes principales del cemento, en calor de hidratación y la figura 3.7. en la resistencia a la compresión.

La fase belita (C_2S) y la alita (C_3S), determinan decisivamente el desarrollo de la resistencia y difieren entre sí en su tasa de endurecimiento y de liberación de calor de hidratación. El contenido de estas dos suma aproximadamente el 75% del cemento.

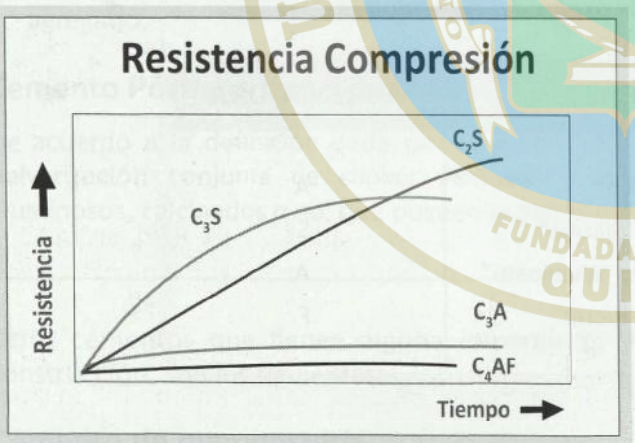


Figura 3.6. *Calor de hidratación de los componentes principales del cemento*

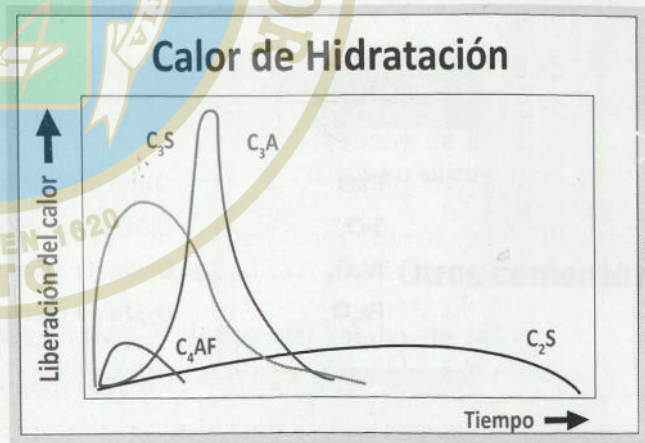


Figura 3.7. *Resistencia de los componentes principales del cemento*

La fase aluminato, está constituida básicamente por C_3A, aunque no es un compuesto puro, sino más bien una solución sólida de C_3A con algo de impurezas de SiO^2 y MgO que reacciona de manera rápida con agua, contribuye con calor alto de hidratación y a una alta resistencia inicial. Además, confiere al concreto, propiedades indeseables como cambios volumétricos y poca resistencia a la acción de los sulfatos, razón por la cual su contenido se limita entre 5 y 15% según el tipo de cemento.

Fuera de las fases principales citadas anteriormente (Tabla 3.3) existen algunos compuestos o fases menores como cal libre (CaO), periclasa (MgO), TiO_2, Mn_2O3, K_2O y Na_2O, que generalmente no sobrepasan un pequeño porcentaje de la masa del cemento. Algunos de estos pueden presentarse puros, especialmente el CaO y el MgO, pero en general las fases no tienen una composición exacta, especialmente las más importantes, pues todas están modificadas por solución sólida, ya sea de los óxidos comunes o de los compuestos menores.

Dos elementos menores que revisten interés son el Na_2O y K_2OA, conocidos como álcalis, debido a que reaccionan con algunos agregados (áridos), creando productos que desintegran el concreto y afectan la velocidad con que adquiere resistencia.

Finalmente, las cantidades efectivas de los diferentes tipos de compuestos varían considerablemente de un cemento a otro y realmente es posible obtener distintas clases de él, agregando en forma proporcional los materiales correspondientes. En la tabla 3.5 se enumeran algunos valores típicos de la composición de los diferentes tipos de cemento.

Tabla 3.5. *Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos de cemento Pórtland (13)*

CEMENTO	COMPOSICIÓN QUÍMICA EN %			
PORTLAND	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Tipo 1	48	27	12	8
Tipo 2	40	35	5	13
Tipo 3	62	13	9	8
Tipo 4	25	50	5	12
Tipo 5	38	37	4	9

Puede observarse que en el cemento Pórtland tipo 2, se rebaja la cantidad de silicato tricálcico y del aluminato tricálcico, puesto que son los dos compuestos que tienen individualmente mayor calor de hidratación.

En el cemento Pórtland tipo 4 se reducen, aún más, los porcentajes de silicato tricálcico y aluminato tricálcico. Naturalmente la reducción del primer componente, hace que este cemento adquiera en forma lenta su resistencia mecánica.

Para el cemento Pórtland tipo 5 se hace una fuerte reducción del contenido de sulfoalu-minato de calcio, para cuando el concreto sea atacado por los sulfatos, y evitar que la sustancia que se forma cuando está endurecido, produzca su destrucción.

- **Hidratación del cemento**

La reacción mediante la cual el cemento Pórtland se transforma en un agente de enlace, se genera por los procesos químicos responsables de la formación de compuestos durante la hidratación, los cuales originan propiedades mecánicas útiles en las aplicaciones estructurales. El cemento al entrar en contacto con agua forma una pasta y se establece un desarrollo lento de estructuras cristalinas cementantes. (Figura 3.8).

- **Formación de la pasta de cemento**

En términos generales, puede decirse que se realiza como consecuencia de las reacciones químicas del cemento con el agua. Dependiendo de la composición del cemento y de las condiciones de hidratación (temperatura, humedad, etc.), lo cual hace que la pasta sea un sistema dinámico que cambia con el tiempo, formando un conjunto complejo de productos de hidratación.

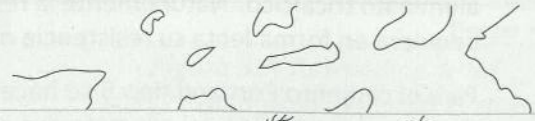
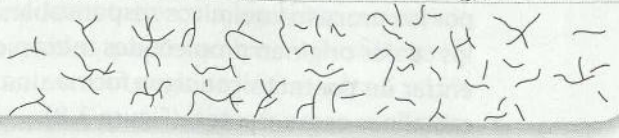
Figura 3.8. Cristales de cemento hidratado

En forma resumida, un grano de cemento, que tiene un diámetro medio aproximado a las 50 micras, después de cierto tiempo de estar en contacto con el agua, empieza a dar señales de actividad química en su superficie y aparecen cristales que van creciendo lentamente para formar una sustancia gelatinosa que los envuelve, llamada gel.

Inicialmente, este gel es inestable, por poseer un porcentaje muy elevado de agua, pero al poco tiempo los compuestos cristalinos que necesitan agua para desarrollarse la absorben del gel, haciendo que éste, a medida que va perdiendo agua, se transforme en uno estable, el cual es responsable en gran medida de las propiedades mecánicas de las pastas endurecidas. En la tabla 3.6 se presenta una descripción simplificada de los procesos de formación de pasta de cemento.

Son principalmente las reacciones de hidratación del clinker, sumándose a ellas, las debidas a la presencia del sulfato de calcio del yeso, las adiciones activas (si las hay), la presencia de aditivos y compuestos menores. Pueden considerarse como principales reacciones de hidratación del clinker, las correspondientes a las de los silicatos y aluminatos de calcio, que en este proceso liberan hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$.

Tabla 3.6. *Formación de la pasta de cemento*

1. INICIO Disperción fina del cemento en el agua	
2. DOS MINUTOS DESPUÉS Gel inestable	
3. DOS HORAS DESPUÉS Gel estable	
4. DOS DÍAS DESPUÉS Desarrollo de las propiedades mecánicas	

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Los cristales de monosilicato de calcio hidratado y aluminatos hidratados se presentan alargados, prismáticos o en agujas. Estos se van entrelazando a medida que avanza el proceso de hidratación, dando lugar a una estructura que va a garantizar la resistencia de las pastas, morteros y concretos. Los espacios son ocupados principalmente por gel, hidróxido de calcio y agua. La tabla 3.7 muestra simplificadamente los fenómenos que ocurren durante el proceso.

Tabla 3.7. Secuencia de las reacciones básicas de hidratación del cemento Pórtland (13)

ETAPAS DE LA REACCIÓN	PROCESOS QUÍMICOS	PROCESOS FÍSICOS	INFLUENCIA DE LA REACCIÓN
Primeros minutos	Rápida disolución inicial de sulfatos y aluminatos de álcali; hidratación inicial	Alta velocidad de evolución de calor. Pueden influir en el fraguado	Los cambios en la composición de la fase líquida inicial de C_3S; formación de estringita
De 1 a 4 horas (periodo de inducción)	Disminución del silicato pero aumento en la concentración de iones de Ca; se inicia la formación de núcleos de CH y C-S-H.	Formación de los primeros productos de la hidratación; baja velocidad de evolución de calor. El sulfato puede influir en el fraguado y la trabajabilidad. La hidratación de los silicatos de calcio termina el fraguado inicial	La formación de cristales con forma de placa o barra por balance inadecuado de iones de aluminatos y la concentración de Ca alcanza un nivel superior de saturación de Ca
De 3 a 12 horas (periodo de aceleración)	Rápida reacción química de los silicatos de Ca para formar C-H-S y CH; disminución de la supersaturación de Ca	La rápida formación de los hidratos provoca una disminución en la porosidad, alta velocidad de la evolución del calor	Fraguado inicial; cambio de consistencia plástica a rígida; desarrollo de la resistencia temprana; fraguado final.
Etapa de posaceleración	Formación de CH y C-S-H controlada por difusión; recristalización de etrinnita a monosulfato y polimerización de posibles silicatos	Disminución de la evolución de calor; continua disminución de la porosidad	Continuo desarrollo de la resistencia a velocidad decreciente. La porosidad y la morfología del sistema hidratado determina la adherencia entre la pasta y el agregado

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1620
QUITO
SIB - UCE

En términos generales, se puede decir que hasta los 3 días de edad, el desarrollo de resistencia se debe a hidratación del C_3S y del C_3A. A los 7 días, prácticamente por el aumento de hidratación del C_3S, ya a los 28 días, el incremento se debe principalmente al C_3S, con pequeña contribución del C_2S. Finalmente, después de los 28 días el incremento se debe a la hidratación del C_2S.

- **Calor de hidratación**

Durante el proceso de hidratación se efectúan reacciones químicas exotérmicas, es decir, reacciones que liberan calor, haciendo que los concretos aumenten su temperatura al fraguar y endurecer. Este incremento es importante cuando se elaboran estructuras que involucran grandes volúmenes de concreto, tales como presas, debido a que cuando ha ocurrido el fraguado y se inicia el descenso de la temperatura, se origina contracción del material, que puede conducir a la formación de grietas y fisuras.

El calor de hidratación se define como la cantidad de calor en calorías por gramo de cemento deshidratado, después de una hidratación completa a una temperatura dada. Depende de la composición del cemento y es aproximadamente igual a la suma de los calores de hidratación de los compuestos individuales. El procedimiento para medirlo se encuentra descrito en la norma NTC117 y ASTM C186.

La tabla 3.8 resume las características de los compuestos principales del cemento.

Tabla 3.8. Características de los compuestos

PROPIEDAD	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
Resistencia	Buena	Buena	Pobre	Pobre
Intensidad de reacción	Media	Lenta	Rápida	Rápida
Calor de hidratación	Medio	Pequeño	Grande	Pequeño
Resistencia a los sulfatos	Buena	Buena	Pobre	Media

Especificaciones químicas

La norma ASTM C 150, fija las especificaciones químicas que debe tener el cemento Pórtland. Mientras en Colombia, la norma NTC 321 es la que fija estas especificaciones.

El significado de algunas de estas limitaciones es el siguiente:

Porcentaje de MgO

El óxido de magnesio MgO que se presenta en el cemento proviene generalmente de las calizas, en forma de dolomita y a veces en pequeñas cantidades de arcilla. Es un hecho reconocido que el MgO no se combina en el proceso de fabricación del cemento y que cuando se presenta en forma cristalina, al hidratarse en concretos en contacto frecuente con el agua aumenta de volumen

en forma sumamente lenta, con posibilidad de desintegración del concreto; aunque es muy discutible la fijación de un límite al contenido de MgO, las normas más reconocidas especifican un máximo alrededor del 5 ó 6%.

Anhídrido sulfúrico SO_3

Su presencia en el cemento se debe casi exclusivamente a la adición final de yeso para control de fraguado, ya que el yeso se combina con el C_3A. Sin embargo, una cantidad excesiva de yeso puede dar lugar a la formación de sulfoaluminatos (cal de Candlot), que por su naturaleza expansiva pueden causar desintegración del concreto.

Pérdida al fuego

En el ensayo se mide la diferencia de masa de una muestra de cemento llevada a una temperatura de 900 a 1000 grados celsius. La diferencia de masa se debe a:

- Pérdida de agua de cristalización, lo cual es un indicio de la eventual iniciación de hidratación del cemento.
- Pérdida de CO_2 debida a iniciación de carbonatación (reacción del aire) o a la existencia en el cemento del $CaCO_3$ pulverizado.

Como se ve, este ensayo de fácil ejecución, puede ser de gran utilidad para determinar si un cemento ha sido almacenado largo tiempo, o en condiciones inadecuadas, o si ha sido adulterado con adición de caliza; además, estas condiciones se muestran también en los ensayos mecánicos.

Residuo insoluble

El ensayo se hace disolviendo una muestra de cemento en ácido clorhídrico HCl; como los silicatos y aluminatos del clinker son todos solubles en este ácido, el insoluble proviene de otra fuente, normalmente sílice aportado por el yeso.

Propiedades físicas y mecánicas

Las propiedades físicas más importantes del cemento que se explicarán más adelante son: densidad, finura, consistencia, tiempos de fraguado, fraguado rápido, expansión, fluidez, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión.

Extracción de muestras

Como se ha visto, el proceso de fabricación de cemento es bastante delicado, razón por la cual se hace necesario que los productores de cemento ejecuten una serie de ensayos que les permitan conocer que determinado lote de producción cumple con todas las normas de calidad exigidas, así mismo, los consumidores de cemento deben ejecutar ensayos de laboratorio que les permitan tomar decisiones sobre aceptación o rechazo del cemento que emplean.

El mejor método analítico basado en los datos tomados en laboratorio, produce resultados inútiles si las muestras no son representativas, razón por la cual la extracción de muestras debe ser realizada teniendo todos los cuidados posibles.

La norma NTC 108 y ASTM C138 describe la metodología que se debe seguir para la extracción y preparación de las muestras de cemento que se utilizarán en los diferentes ensayos, para determinar las propiedades físicas y químicas sobre él. (Figura 3.9).

Los ensayos que se practican al cemento se pueden clasificar según la forma y estado en que se encuentra. A manera de resumen en la tabla 3.9 se enumeran las normas en donde se describen los procedimientos para cada uno de ellos.

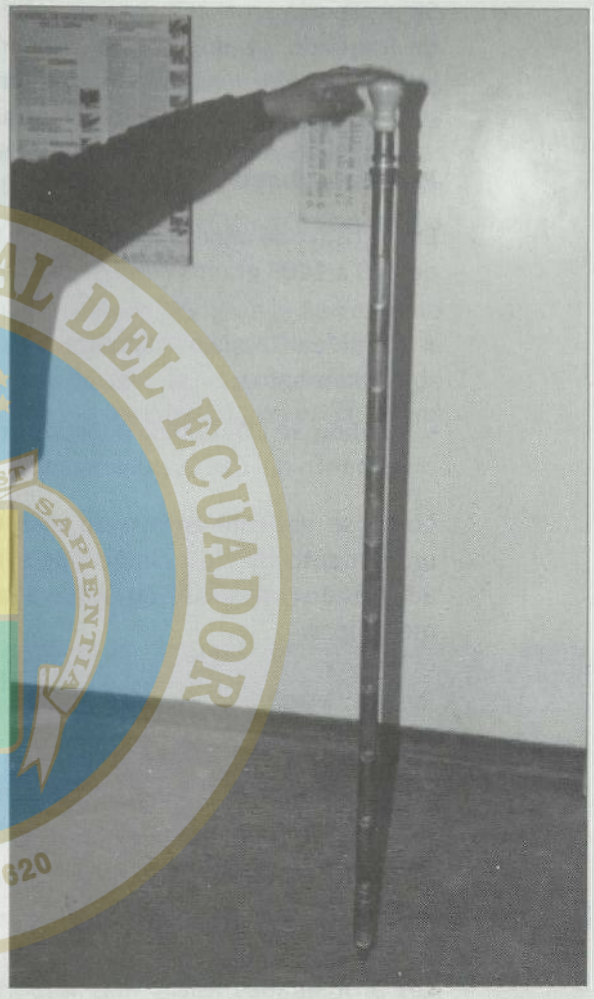


Figura 3.9. Toma de muestras de cemento

- **Densidad del cemento**

Es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco, y en un cemento Pórtland normal, suele estar muy cercano a 3,15 g/cm^3. En el caso de los cementos adicionados, es menor porque el contenido de clinker por tonelada de cemento es inferior, y su valor normalmente es del orden de 2,90 g/cm^3, dependiendo del porcentaje de adiciones.

En realidad la densidad del cemento no indica directamente la calidad del mismo, pero a partir de ella se pueden deducir otras características cuando se analiza en conjunto con otras propiedades. Por ejemplo, si no se dispone de un análisis químico y se obtiene una baja densidad y una alta finura, se puede afirmar casi con seguridad, que se trata de un cemento adicionado.

Esta medida es indispensable en el diseño y control de mezclas de concreto, en donde se requiere conocer cuánto espacio ocupa determinada masa de cemento. Esto se hace aplicando la ecuación que establece que la densidad de un material es igual a su masa dividida por su volumen.

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Masa}}{\text{Volumen}}$$

La determinación de la densidad del cemento se puede hacer por varios métodos. De los más importantes se tienen los de Le Chatelier, Schumann, Mann, Candlot y el del picnómetro. De estos, el más conocido en nuestro medio es el que utiliza el frasco de Le Chatelier especificado en la norma NTC 221 y en la ASTM C188. Este frasco permite medir el volumen correspondiente a una cierta masa de cemento, por medio del desplazamiento de un líquido que no reacciona con él (generalmente Kerosene), aprovechando el principio de Arquímedes.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Tabla 3.9. Lista de ensayos practicados sobre el cemento

Tema	Norma NTC	Antecedente ASTM	Normas que deben consultarse
NORMAS GENERALES			
Cemento Pórtland. Clasificación y nomenclatura	30		
Cemento Pórtland. Definiciones	31		
Cementos. Extracción de muestras	108	C138	32
Exudación de pastas y morteros	547	C243	111
ESPECIFICACIONES			
Cemento Pórtland. Especificaciones físicas y mecánicas	121	C150	30, 31, 33, 107, 109, 117, 118, 220,297,321,397,597
Cemento Pórtland. blanco	1362	C150	33,107,108,109, 116,118
PROPIEDADES QUÍMICAS			
Actividad puzolánica	1512		
Actividad puzolánica. Resistencia a compresión	1784		32, 112, 121, 120
Análisis químicos	184	C114	
ENSAYOS SOBRE CEMENTO			
Finura. Aparato de Blaine	33	C204	121
Finura. Tamices NTC 44	294	C430	32
Finura. Tamices NTC 75 y 149	226	C184	32, 184
Finura. Turbidímetro	597	C597	32, 294
Densidad	221	C188	
ENSAYOS SOBRE LA PASTA DE CEMENTO			
Calor de hidratación	117	C186	32
Consistencia normal. Aparato de Vicat	110	C187	107
Expansión del cemento. Agujas de Le Chatelier	1514		110
Expansión del cemento. Autoclave	107	C151	110
Expansión del cemento. Método de la pasta	297	C451	107, 110, 112, 121
Fluidez de morteros. Masa de flujo	111	C230	
Tiempo de fraguado. Aparato de Guilmore	109	C266	110, 118
Tiempo de fraguado. Aparato de Vicat	118	C191	110, 112
NORMAS GENERALES			
Contenido de aire	224	C185	32, 111, 112, 226
Expasión potencial	397	C452	32, 107, 111, 112, 220
Falso fraguado. Método del mortero	225	C359	110, 112, 119, 121, 220
Resistencia a compresión	220	C109	111, 112, 226
Resistencia a flexión	120	C348	19, 107, 111, 112, 119, 220
Resistencia a tensión	119	C190	32, 78, 107, 110

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620 QUITO

- **Finura del cemento**

El proceso de molienda de clinker y yeso determina la finura del cemento que es el tamaño de las partículas de cemento. La finura es una de las propiedades físicas más importantes del cemento, ya que está íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia.

Puesto que la hidratación de los granos de cemento se inicia desde la superficie hacia el interior, el área superficial total de las partículas de cemento constituye un parámetro determinante para regular la velocidad de hidratación. Así, un cemento con partículas de mucha área específica, o sea, de alta finura, endurece con mayor velocidad y tiene un desarrollo rápido de resistencia.

Sin embargo, un alto grado de finura representa un costo considerable debido a que aumenta el tiempo de molienda; y cuanto más fino sea un cemento, se deteriorará con mayor rapidez, debido a que absorbe más fácilmente la humedad del aire. Adicionalmente, liberan mayor cantidad de calor de hidratación ocasionando mayor retracción y por lo tanto son más susceptibles a la fisuración. Pero un cemento fino, exuda menos que uno más grueso, debido a que retiene mejor el agua al tener mayor superficie de hidratación.

Por otro lado, los cementos con partículas muy gruesas se hidratan y endurecen muy lentamente, lo que puede producir exudación de agua por su escasa capacidad para retenerla. De hecho la hidratación de las partículas de cemento es muy lenta y se estima que su velocidad es del orden de 3.5 micras en 28 días. Esto significa que las partículas relativamente gruesas pueden durar varios años en hidratarse, e inclusive no llegar a hacerlo nunca en forma interior, quedando dentro de ellas un núcleo inerte, lo cual se traduce en disminución de la resistencia a la compresión, como ilustra la figura 3.10.

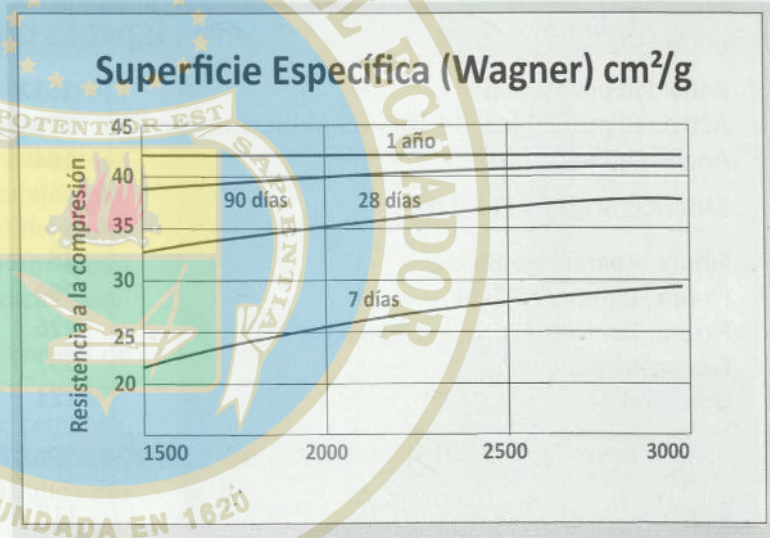


Figura 3.10. Influencia de la finura sobre la resistencia.

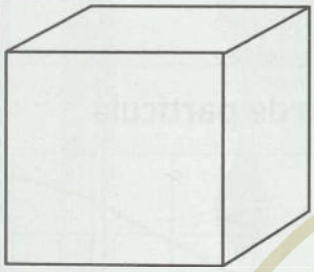
De acuerdo con lo anterior, se puede observar que la finura es una propiedad vital del cemento y tiene que someterse a un control cuidadoso.

La finura se puede medir por métodos directos e indirectos y se expresa por el área superficial de las partículas contenidas en un gramo del material, lo cual se denomina «superficie específica» y se mide en cm²/gr. La figura 3.11. ayuda a comprender el concepto de superficie específica. En ella se muestra el aumento de superficie específica para un cubo de masa constante que se va fraccionando.

- **Finura por tamizado**

Dentro de los métodos indirectos se tienen los procedimientos de tamizado, los cuales se utilizaron mucho en el pasado y que aún se usan pero con menor frecuencia. La norma ASTM C184 describe el procedimiento que consiste en tamizar 50 gr de cemento por un tamiz de 75 micras (#200),

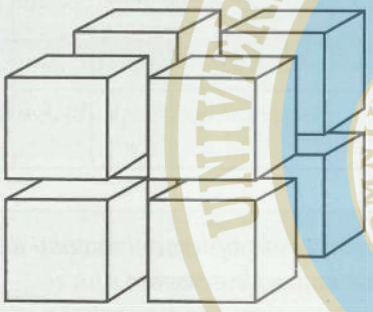
A. Cubo 1 g de masa y 1 cm de arista



Área superficial 0 1 cm^2 * 6 caras = 6 cm^2

Superficie específica = 6 cm^2/g

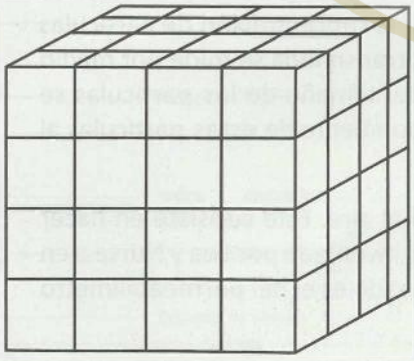
B. Cub de 1 g de masa divido en 8 cubitos de 0,5 cm de arista



Área superficial = (0,5*0,5) cm^2 * 6 caras * 8 cubos = 12 cm^2

Superficie específica = 12cm^2/g

C. Cubo de 1 g de masa dividido en 64 cubitos de 0,25 cm de arista



Área superficial = (0,25*0,25) cm^2 * 6 caras * 64 cubos = 24 cm^2

Superficie específica = 24cm^2/g

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Figura 3.12. *Distribución típica del tamaño de las partículas de*

o por un tamiz de 149 micras (#100) y determinar el porcentaje que pasa por este. La norma NTC294 y ASTM C430 describe un sistema, similar al de la norma ASTM C184, que consiste en tamizar 1 gr de cemento por un tamiz de 44 micras (#325) bajo la acción de un chorro de agua a una presión de 0.7 kg/cm².

El tamizado por las mallas no da una idea muy clara del tamaño de las partículas, sin embargo, permite detectar la presencia anormal de unas muy gruesas, que pueden ser debidas a deficiencias en la molienda o a principio de hidratación del cemento almacenado por un tiempo relativamente largo. Como estos métodos no aportan información sobre el tamaño de las partículas de menor diámetro al del tamiz empleado, dejan un vacío que impide predecir con absoluta confianza el comportamiento durante el proceso de hidratación. Podría pensarse que para conocer la distribución de las partículas más finas podría tamizarse el cemento sobre tamices de menor tamaño que el de 44 micras, pero esto no tendría éxito debido a las obstrucciones que se producen en mallas tan finas.

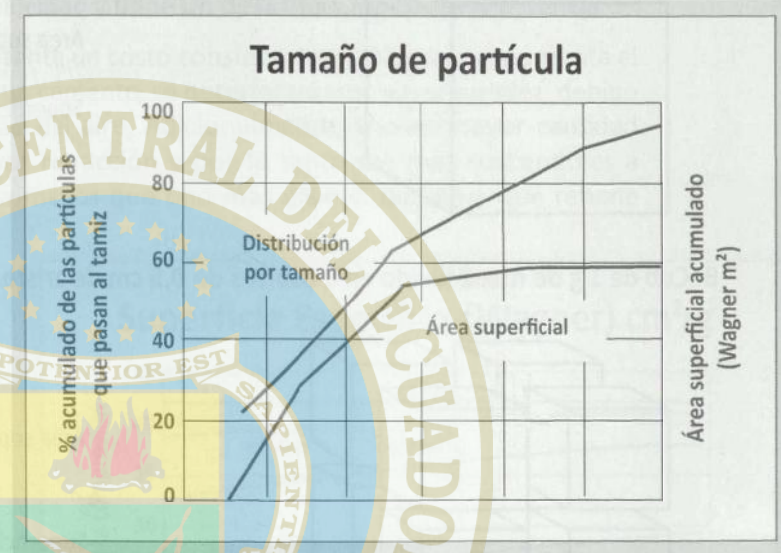


Figura 3.12. Distribución típica del tamaño de las partículas de cemento

- **Finura por métodos indirectos**

Dentro de los métodos indirectos se tiene el procedimiento del turbidímetro de Wagner, el cual se fundamenta en la velocidad con que se sedimenta una suspensión de cemento en un fluido (Kerosene), ya que existe una dependencia directa entre la velocidad de caída de las partículas y su diámetro, expresada en la ley de Stoke. La norma NTC597 y ASTM C597 describe el procedimiento para medir de manera aproximada la distribución del tamaño de las partículas de cemento. En este ensayo se emplea un haz de luz para determinar la concentración de partículas en suspensión a un nivel dado de kerosene, y el porcentaje de luz transmitida se mide por medio de una celda fotoeléctrica. Una forma típica de la repartición del tamaño de las partículas se ilustra en la figura 3.12, la cual señala además el aporte correspondiente de estas partículas al área total superficial de la muestra.

Un procedimiento más reciente es el método de permeabilidad al aire. Este consiste en hacer circular aire a través de una capa de cemento dentro de un aparato inventado por Lea y Nurse o en el aparato modificado por Blaine. En nuestro medio, el más empleado es el del permeabilímetro de Blaine, descrito en la norma NTC33 y ASTM C204.

El método de Blaine para determinar la superficie específica del cemento se basa en que la cantidad y el tamaño de los poros de una muestra de determinada densidad son función del tamaño de las partículas y de su distribución granulométrica, y se pueden determinar por la permeabilidad al aire de un conjunto de partículas de cemento. El ensayo consiste en medir el tiempo necesario para que una cantidad de aire pueda atravesar una muestra de densidad conocida. En este método, se tiene una imagen clara de la variación relativa en la finura de

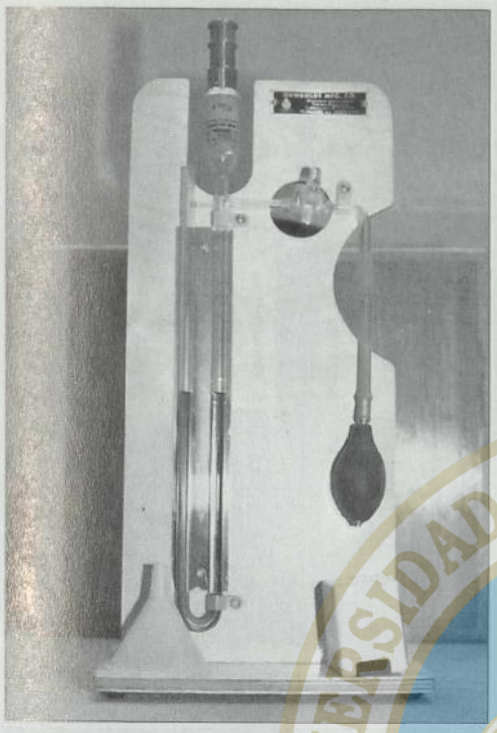


Figura 3.13. Aparato de Blaine

cemento, y para efectos prácticos esto es suficiente. El método de Wagner es un poco más informativo, puesto que indica la distribución por tamaño de las partículas.

En nuestro medio, la superficie específica de los cementos está comprendida entre 3400 y 4500 cm²/g (Blaine). La norma NTC121 y ASTM C150 establece que, como mínimo debe ser 2800 cm²/g (Blaine). Sin embargo, una alta finura por este método, no necesariamente puede indicar una buena molienda de clinker, debido a que puede ser consecuencia de las adiciones que se hacen, ya que estas son de menor tamaño que las partículas de cemento Pórtland propiamente dicho.

Ensayos sobre la pasta de cemento

Como es sabido, el conjunto de cemento, agua y aire se llama pasta, y sobre ella se pueden realizar ensayos que permitan determinar la calidad y propiedades del cemento.

- **Consistencia normal**

Es la propiedad que indica el grado de fluidez o la dificultad con que la pasta puede ser manejada. Es medida empleando el aparato de Vicat, representado en la figura 3.14. de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma NTC110 y ASTM C187.

Los cementos Pórtland, pueden diferir entre sí en cuanto al requerimiento de agua, y la diferencia es aún mayor en los que tienen adiciones, los cuales tienen requerimientos de agua más altos que los cementos normales, esto por su mayor superficie específica.

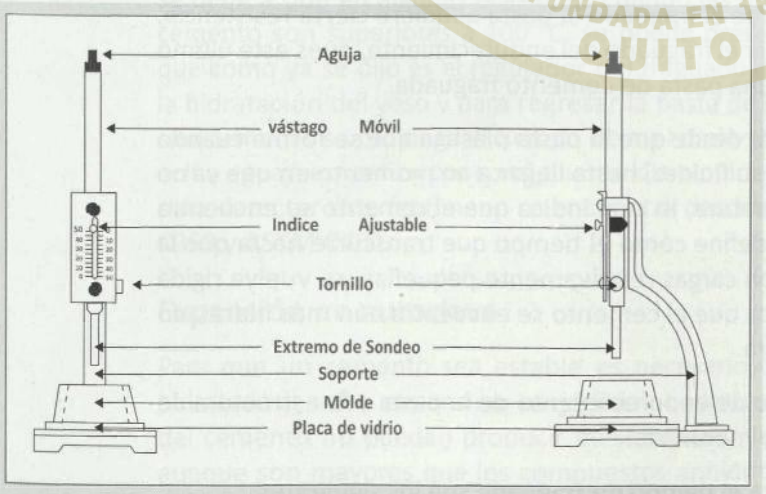


Figura 3.14. Aparato de Vicat.

La cantidad de agua que se le agrega al cemento, le proporciona una determinada fluidez, esta propiedad aumenta al incrementarse el contenido de agua. Existe una determinada fluidez para la cual debe agregarse cierta cantidad de agua. Es lo que se llama consistencia normal.

Originalmente se pensaba que el contenido de agua necesaria para obtener una pasta de consistencia normal, representaba no sólo el requerimiento de agua para una pasta de cemento determinada, sino también para un concreto que estuviera hecho de ese cemento.

Sin embargo, esto no es así, debido a que por ejemplo el contenido de agua de una pasta de consistencia normal es mayor en un cemento fino pero, por el contrario, un

aumento en la finura del cemento mejorará la trabajabilidad de una mezcla de concreto. La razón de ésta paradoja, es que los resultados de las pruebas de consistencia de la pasta de cemento y de la trabajabilidad (manejabilidad) en el concreto establecen propiedades diferentes de la pasta fresca. En la primera, se mide viscosidad y en la segunda capacidad de lubricación. Adicionalmente, el aire que se encuentra en forma accidental afecta la trabajabilidad de la pasta de cemento, y los cementos de diferente finura pueden contener distintas cantidades de aire. De tal manera, que los valores encontrados en un ensayo de consistencia normal no se utilizan para el control de calidad del cemento y por eso las normas no indican valores máximos o mínimos.

El ensayo para determinar la consistencia normal de la pasta de cemento, consiste en agregar un volumen conocido de agua a 500 g de cemento, de manera, que se obtenga una fluidez tal, que después de amasada y colocada en un molde troncocónico, permita la entrada de la aguja gruesa del aparato de Vicat en 10 mm + 1 mm. La aguja se debe dejar penetrar en la pasta por la acción de su propia masa (300 g), durante 30 segundos.

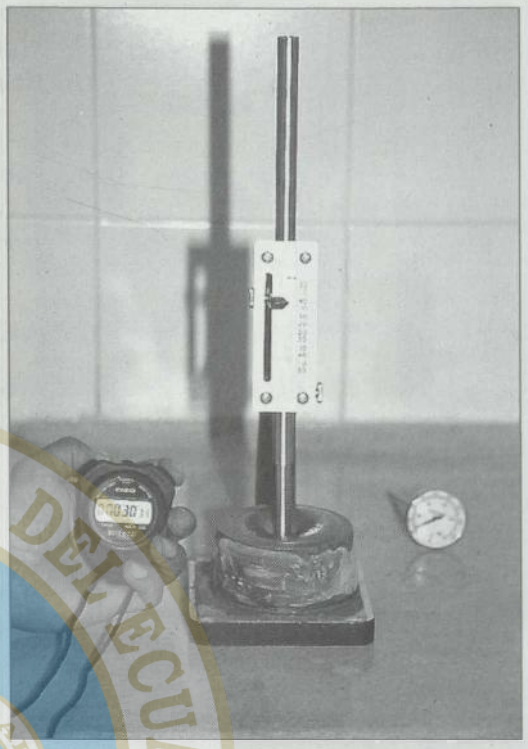


Figura 3.15. Determinación de la consistencia normal de cemento.

El contenido de agua de una pasta normal se expresa en porcentaje en masa del cemento seco y suele variar entre 23 y 33 por ciento, dependiendo de las características de este. La consistencia normal es una característica que se puede considerar complementaria de otros ensayos que si tienen relación directa con la calidad del cemento como son la determinación de los tiempos de fraguado y la estabilidad de volumen, que se discutirán más adelante.

- **Tiempos de Fraguado**

Este término es utilizado para describir la rigidez de la pasta, es decir para especificar el cambio de estado fresco a endurecido. Aunque durante el fraguado la pasta adquiere cierta resistencia, para efectos prácticos es conveniente distinguir el fraguado del endurecimiento, pues este último se refiere al incremento de la resistencia de una pasta de cemento fraguada.

El fraguado inicial es el tiempo que transcurre desde que la pasta plástica que se forma cuando el cemento se mezcla con agua va perdiendo su fluidez, hasta llegar a un momento en que ya no tiene toda su viscosidad y se eleva su temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra parcialmente hidratado. El fraguado final se define como el tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado (aunque no totalmente) y la pasta ya está dura.

A partir de ese momento empieza el proceso de endurecimiento de la pasta y la estructura de cemento fraguado va adquiriendo resistencia mecánica.

Los parámetros que afectan de mayor manera el tiempo de fraguado son los siguientes:

- ***Composición química del cemento:*** los que tienen un alto contenido de C_3A y C_2S fraguan más rápido, así como los que contienen poco yeso.

- ***Finura del cemento:*** mientras mayor sea, la velocidad de hidratación es mayor y por tanto los tiempos de fraguado son menores.
- ***Agua de amasado:*** a mayor cantidad más rápido es el fraguado.
- ***Temperatura ambiente:*** a mayor temperatura ambiente se obtienen menores tiempos de fraguado, por cuanto las reacciones químicas de hidratación se aceleran con el aumento de temperatura.

Conocer los tiempos de fraguado inicial y final, es importante porque así se puede estimar el tiempo disponible para mezclar, transportar, colocar, vibrar y afinar concreto en obra, así como para curarlo y colocarlo en servicio.

La determinación de estos tiempos se puede hacer de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma NTC 109 o ASTM C266, empleando el aparato de Gillmore. Otro método utilizado es el de la aguja de Vicat. Este consiste en medir la penetración producida por una aguja de 1 mm de diámetro y 300 g de peso, sobre una pasta de consistencia normal a diferentes tiempos. Cuando la penetración de la aguja es de 25 mm, se considera que se ha presentado el fraguado inicial y cuando la aguja deja una ligera huella sobre la superficie de la pasta, sin penetrarla, se ha presentado el fraguado final.

Para la determinación exacta del momento de fraguado inicial, se toman lecturas antes y después de que dicho fenómeno ocurra, y luego al localizar estos puntos sobre un gráfico que tenga en las ordenadas las penetraciones y en las abscisas los tiempos, se dibuja la línea promedio de los puntos encontrados experimentalmente o se hace una regresión lineal, para encontrar la ecuación de la recta y obtener el valor del tiempo correspondiente a una penetración de 25 mm.

- **Falso fraguado**

Es el fenómeno que ocurre a la pasta de cemento cuando adquiere una rigidez prematura y anormal, dentro de los primeros minutos después de mezclar el cemento y el agua. A diferencia del fraguado relámpago este no despide calor en forma apreciable y si la pasta se remezcla sin adicionar agua, se restablece su plasticidad sin afectar el fraguado y la resistencia. Este fenómeno se debe a que en algunas ocasiones cuando las temperaturas en los molinos de fabricación de cemento son superiores a 100 °C, se puede presentar deshidratación total o parcial del yeso, que como ya se dijo es el regulador del fraguado del cemento. Esta rigidización es producto de la hidratación del yeso y para regresar la pasta de cemento a su estado de trabajabilidad inicial simplemente se prolonga el tiempo de mezclado sin adicionar agua, porque esta alteraría la relación agua/cemento y por consiguiente disminuiría la resistencia. La metodología que se emplea para detectar este fenómeno se encuentra descrita en las normas NTC 225 y NTC 297 o ASTM C359 y ASTM C451.

Expansión en autoclave

Para que un cemento sea estable es necesario que ninguno de sus componentes, una vez hidratados, sufra expansión perjudicial o destructiva. Los cuatro componentes principales del cemento no pueden producir inestabilidad, ya que sus volúmenes después de hidratados aunque son mayores que los compuestos anhídridos, son inferiores a los volúmenes de éstos más el volumen de agua necesaria para la hidratación; por eso la pasta de cemento al endurecer disminuye de volumen, fenómeno denominado retracción. La casi totalidad de la retracción ocurre en los primeros 2 ó 3 meses de hidratación del cemento.

La posible expansión del cemento, proviene de otras fuentes distintas a sus componentes principales, tales como la periclasa (MgO cristalino), de la cal libre (CaO) y el $CaSO_4$.

Las normas limitan la expansión potencial de un cemento por medio del ensayo de autoclave (NTC 107 y ASTM C151). Este consiste en medir el cambio de longitud de unas barras de 2,5 * 2,5 * 25,4 cm hechas de pasta de cemento y sometidas durante tres horas a alta temperatura y presión. El cambio de longitud en porcentaje es la expansión. (Figura 3.16).

A este ensayo se le han hecho serios reparos en el sentido de que si un cemento excede el límite permitido de expansión no necesariamente es un cemento expansivo en condiciones de temperatura y presión ambiente; por esta razón en muchos países se ha adoptado mejor el ensayo de las agujas de Le Chatelier (NTC 1514), las cuales permiten medir el cambio de diámetro de los cilindros hechos con pasta de 3 cm de diámetro y 0,5 cm de alto, curados en agua a temperatura ambiente y de ebullición. Cuando el ensayo se realiza en frío la expansión se debe al exceso de cal y/o de sulfato de calcio pero cuando se hace en caliente la expansión es producida por el exceso de cal libre y de periclasa.

Figura 3.16. Aparato de autoclave

Ensayos sobre el mortero

- **Resistencia mecánica**

Los ensayos de resistencia generalmente están indicados en todas las especificaciones del cemento debido a que la resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad del material que posiblemente resulta más obvia en cuanto a los requisitos para usos estructurales.

La manera más lógica de medir la resistencia mecánica de los cementos es, aparentemente, sobre probetas hechas con pasta ya que así se limita la dispersión que aparece en los resultados cuando se usan probetas de mortero o concreto, en las cuales los resultados se ven afectados por la variación de las características de los agregados (áridos) usados. Sin embargo, se ha demostrado en múltiples investigaciones que el comportamiento mecánico de distintos cementos varía al ensayarlo en probetas con agregados (mortero o concreto), y por tanto desde el punto de vista de las aplicaciones del cemento, la determinación de resistencia mecánica sobre probetas de pasta no tiene mayor utilidad.

Estas consideraciones hacen pensar que, la resistencia mecánica se debería medir sobre probetas de concreto, ya que es esta la aplicación más importante del cemento, pero el tamaño relativamente grande de las muestras y la dificultad de obtener agregados gruesos normalizados han hecho que prácticamente ningún país del mundo utilice ensayos mecánicos sobre muestras de concreto con miras a calificar los cementos. Existe entonces a nivel mundial un acuerdo casi completo en el uso de mortero para estos ensayos, como solución intermedia entre la pasta y el concreto.

En cuanto a la arena normal para preparación del mortero no existe un total acuerdo entre las normas de los diferentes países, en algunos se sigue la orientación de las normas ASTM.

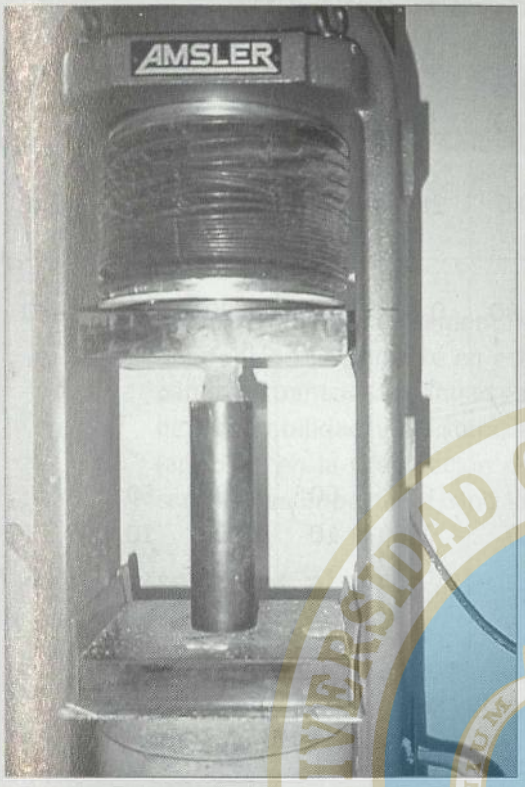


Figura 3.17. Ensayo de cubos de mortero a la compresión

En la proporción en que deben mezclarse el cemento y el agua tampoco hay acuerdo, ya que la mayoría de los países exige una mezcla 1:3 (3 partes de arena por 1 de cemento) en tanto que de acuerdo a la norma NTC 220 (y a la ASTM C109) debe ser 1:2,75. Sin embargo se ha demostrado que la variación de resistencia a compresión varía menos del 7% cuando la proporción está entre 1:2 y 1:3,5. (Figura 3.17)

- **Resistencia a flexión**

Este ensayo se encuentra descrito en la norma NTC 120 y en la ASTM C348, con el se pretende conocer el comportamiento del mortero cuando es sometido a esfuerzos de flexión. A este ensayo se le critica por conducir a resultados poco reales debido al comportamiento no elástico del mortero, que hacen que los esfuerzos máximos a flexión que se presentan en el ensayo sean distintos a los calculados aplicando las fórmulas clásicas de la resistencia de materiales.

- **Ensayo a tracción**

Este ensayo ha sido empleado durante más de 40 años y con él se busca conocer el comportamiento del mortero cuando es sometido a tensión. Presenta serios inconvenientes cuando se aplica a materiales pétreos, como es el mortero; además, en las probetas en forma de ocho que se usan para este ensayo se presentan concentraciones de esfuerzos hasta un 80% por encima del esfuerzo promedio, lo cual conduce a una dispersión muy alta en los resultados, como del 35%. Por éstas y otras razones este tipo de solicitación ya prácticamente no se usa, sin embargo el ensayo se encuentra descrito en la norma NTC 119 y en ASTM C190.

- **Ensayo a comprensión**

Este ensayo se realiza de acuerdo a la norma NTC 220 y ASTM C109 sobre cubos de 5,08 cm de arista. Vale la pena observar que, la fricción ejercida por los platos de la máquina de ensayo sobre las caras a compresión de la probeta, impide la expansión lateral de la misma, y por tanto aparecen esfuerzos secundarios de relativa importancia en la medida de la resistencia final. Se ha demostrado que este efecto desaparece en la parte central de una probeta de una altura mayor de 1,5 veces el ancho de la misma y precisamente buscando esta ventaja, en el Brasil los ensayos de cemento se hacen sobre cilindros de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura, con lo cual se limita la dispersión en los resultados por una mejor uniformidad del mortero en un molde carente de aristas vivas.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
SIB - UCE

Tabla 3.10. Requisitos físicos y mecánicos del cemento Pórtland (5)

Requisitos físicos y mecánicos	Tipo 1	Tipo 1M	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4	Tipo 5
Superficie específica por permeabilímetro de Blaine m^2/kg. Valor promedio, mínimo	280	280	280	-----	280	280
Estabilidad Expansión en autoclave, máximo, por ciento	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Tiempo de fraguado Pro Agujas Gilmore						
Tiempo inicial en minutos, no debe ser menor de	60	60	60	60	60	60
Tiempo final en horas, no deber ser mayor de	10	10	10	10	10	10
Por aguja Vicat						
Tiempo inicial en minutos, no debe ser menor de	45	45	45	45	45	45
Tiempo final en	10	10	10	10	10	10
Resistencia ala compresión en kg/cm^2*						
1 día	----	----	----	100	----	----
3 días	80	125	105	210	----	75
7 días	150	195	175	**	70	155
28 días	240	----	----	----	175	210

* La resistencia a la comprensión de cubos de mortero hechos de una parte de cemento y 2,75 partes de arena gradada normalizada para este ensayo los cubos deben ser preparados y probados de acuerdo a la Norma NTC 220 y no debe ser menor del valor indicado para cada edad.

** Mayor que la resistencia obtenida a tres días.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

AGUA PARA EL CONCRETO

Capítulo 4

Generalidades

Es un ingrediente fundamental en la elaboración de concreto y mortero debido a que desempeña una función importante en estado fresco y endurecido. Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto a la cantidad para proveer una relación agua/cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero es evidente, que para usarla en el lavado de agregados (áridos), en la preparación de la mezcla o durante el curado del concreto, no solamente su cantidad es importante, sino también su calidad química y física.

Términos relativos al agua

Se encuentran en la norma ASTM D-1129. A continuación se transcribe un aparte de la definición de los términos más frecuentes en la tecnología de concreto:

- **Acidez:** capacidad de los medios acuosos de reaccionar con los iones OH.
- **Alcalinidad:** capacidad de los medios acuosos de reaccionar con los iones H.
- **Análisis de control:** determinación de los parámetros específicos usados como criterio para las operaciones propias de un sistema.
- **Cloro residual:** cantidad disponible de cloro presente en agua a cualquier tiempo especificado.
- **Dureza:** concentración de cationes polivalentes de agua. Generalmente calcio y magnesio.
- **Partes por millón (ppm):** unidad química equivalente a la cantidad en masa del soluto que hay en un millón de unidades de masa de la solución.
- **Partículas en suspensión:** materia no líquida dispersada heterogéneamente del agua.
- **pH:** es un valor variable entre 0 y 14 que indica la acidez o la alcalinidad de una solución. Logaritmo negativo de la actividad del ión hidrógeno en soluciones acuosas.
- **Producto de corrosión:** resultan de la reacción química y electroquímica entre un metal y el medio ambiente.
- **Sedimento:** depósito de agua formada por sedimentación.
- **Sólidos disueltos:** materia dispersa en agua formando una sola fase homogénea.
- **Turbidez:** reducción de transparencia de una muestra debida a la presencia de material particular.

Agua de lavado de agregados

Es la utilizada durante el proceso de trituración, para retirar impurezas y exceso de finos presentes en los conglomerantes de los que provienen, así como las partículas muy finas formadas durante la trituración. Debe ser lo suficientemente limpia como para no introducir contaminación a los materiales procesados, como puede ser exceso de partículas en suspensión, especialmente materia orgánica o sales, que posteriormente afectan la calidad del concreto producido con estos.

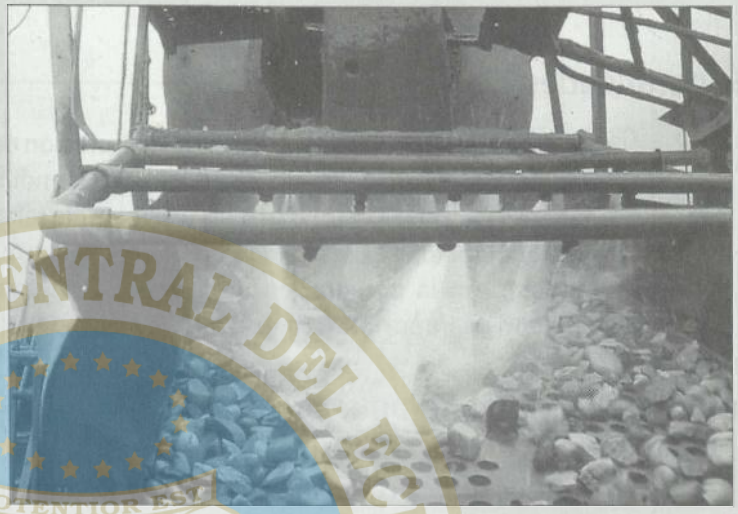


Figura 4.1. Lavado de agregados

Agua de mezclado o amasado

Se adiciona junto con los agregados y el cemento. Se necesita éste último para producir una pasta hidratada con fluidez tal, que permita la lubricación adecuada de la mezcla de concreto cuando se encuentre en estado plástico, esta pasta va estructurándose de forma diferente para producir el gel de cemento.

Dependiendo de la cantidad de agua adicionada la fluidez de la pasta será mayor o menor, y al endurecerse una cantidad del agua quedará fija como parte de la estructura y otra permanecerá como agua libre. Si la medida de agua de mezclado aumenta, la parte fija es la misma y por consiguiente el agua libre aumenta, con lo cual se aumenta la porosidad, debido a que con el tiempo, esta agua libre se evapora dejando unos pequeños conductos en el interior del concreto endurecido. Con este aumento se disminuye la resistencia y el concreto se hace más permeable. De ahí la importancia del control de la cantidad de agua utilizada en la mezcla.

Figura 4.2. Mezclado del concreto

Agua de curado

Una vez el concreto ha fraguado, es necesario el suministro de agua para garantizar la completa hidratación del grano de cemento, esta agua adicionada

depende de la temperatura y humedad del ambiente donde se encuentre el concreto, ya que a menor humedad relativa, la evaporación es mayor. El objeto del curado es mantener el concreto saturado, o lo más próximo posible a la saturación, hasta que los espacios que inicialmente estaban saturados de agua se llenen hasta un nivel deseado con los productos de la hidratación del cemento. (Figura 4.3).

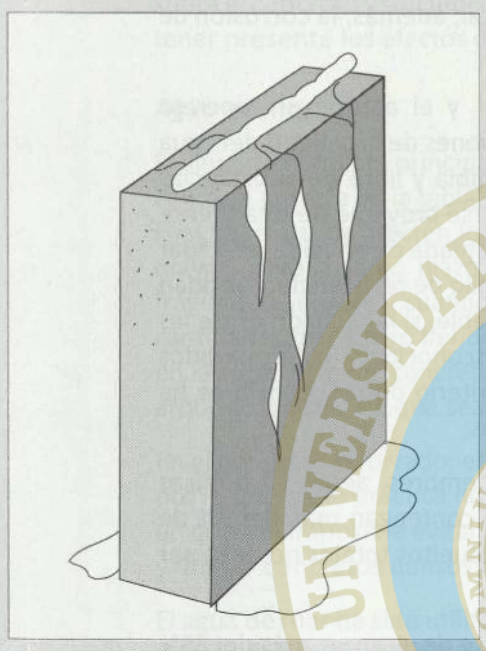


Figura 4.3. *Curado del concreto con agua*

El agua que se utiliza en la mezcla, generalmente, es apta para el curado, sin embargo, la causa más común de las manchas en las superficies del concreto, es por la presencia de una alta concentración relativa de hierro o materias orgánicas. Así mismo, bajas concentraciones de estas impurezas pueden causar manchas si el agua fluye lentamente sobre el concreto y se evapora. No existe ningún método práctico y confiable que relacione las posibilidades de manchas con los contenidos de impurezas orgánicas o de hierro contenido en el agua.

En la evaluación de las impurezas que contienen las aguas de curado se deben tener las siguientes dos consideraciones:

- Que no manchen las superficies del concreto.
- Que no ataquen ni deterioren el concreto.

En algunos casos, las manchas superficiales no son tan importantes, pero siempre es necesario que el agua de curado esté libre de sustancias que ataquen el concreto endurecido. Por otro lado, en el caso de concretos arquitectónicos o a la vista, resulta mucho más perjudicial emplear aguas con impurezas durante su curado que en su amasado. Es el caso del agua del mar, se puede usar para amasar concreto no reforzado, pero no se puede utilizar durante su curado.

Calidad del agua

Las exigencias de calidad, varían en algunos países en función de las características propias del cemento, pero en general existe uniformidad de criterios fruto de los resultados de investigaciones desarrolladas en U.S.A., España, Inglaterra, etc.

En nuestro país en general, fuera de los perímetros urbanos, se corre el riesgo de utilizar aguas de calidad desconocida, las cuales no son estudiadas para su empleo en la elaboración de hormigones, de ahí la necesidad de difundir esta información, que permita tratar de adquirir la mejor información de la bondad del abastecimiento, en cuanto a la calidad de los hormigones que puedan generar.

Efecto de las impurezas en el agua de mezcla

Existe la creencia popular, que si el agua es apta para beber, es óptima para hacer hormigón, sin embargo, esto no es del todo cierto, pues algunos acueductos o plantas de tratamiento de agua, utilizan o adicionan para el consumo substancias que pueden interferir con el fraguado

del cemento, o pueden promover la corrosión del refuerzo o manchar el concreto, tales como, sulfatos de aluminio, cloro, sabores artificiales, flúor, azúcares, etc. Así mismo, un agua apta para mezclar o curar concretos puede no ser necesariamente buena para tomar.

Cuando el agua para una obra proviene de un pozo, es conveniente analizarla periódica y sistemáticamente para comprobar que no varía el p.H. o las impurezas a través del tiempo.

Las impurezas pueden interferir con el fraguado del cemento, afectar adversamente la resistencia del concreto o causar manchas en su superficie y provocar, además, la corrosión de los aceros de refuerzo.

Es necesario distinguir entre los efectos del agua de mezclado y el ataque al concreto endurecido por parte de aguas agresivas. En general las especificaciones de la calidad del agua para amasado plantean la necesidad que el agua se encuentre limpia y libre de substancias perjudiciales. En algunos casos se establece que si el agua a emplearse proviene de una fuente desconocida, deben prepararse concretos con ésta y con el agua destilada o conocida, efectuar comparaciones de su comportamiento durante el fraguado, desarrollo de resistencia, cantidad de aire atrapado o incluido, etc. Se considera que el agua es aceptable, si la relación entre las resistencias de especímenes preparados con el agua de calidad desconocida y los preparados con agua destilada, es mayor del 85%. Con base en el anterior criterio de resistencia se ha establecido que no se aceptan para elaborar concreto, las siguientes:

Aguas ácidas -ácido húmico-, aguas básicas provenientes de curtiembres, aguas carbónicas provenientes de descargas de plantas de galvanización, aguas que contengan más del 3% de NaCl o 3.5% de SO_3 Na_2, aguas con azúcar. El contenido de sólidos disueltos totales no debe ser mayor de 2140 ppm, para las aguas carbonatadas.

Las siguientes aguas se aceptan para elaborar concreto, sobre la base de alcanzar más del 85% de las resistencias respecto a un agua destilada: aguas con un contenido máximo de 1% de Sulfatos; agua de mar pero no para concretos reforzados, aguas alcalinas con un contenido máximo del 0.15% de Na_2SO_4 o NaCl, aguas provenientes de minas de carbón y yeso y aguas de desecho de fábricas como por ejemplo: cerveza, plantas de gas, pinturas y jabón.

Las provenientes de abastecimientos desconocidos, frecuentemente se usan en la elaboración de morteros o concretos en obra o construcción. Por lo cual es necesario plantear los riesgos que se afrontan, respecto a conseguir concretos técnica y económicamente aceptables, al utilizar aguas desconocidas que puedan aportar, substancias nocivas disueltas o en suspensión, tales como, materia orgánica, azúcares, sulfatos o cloruros.

El agua que se emplea para lavado de las ollas mezcladoras o cubas hormigoneras se puede utilizar para elaborar concreto, siempre y cuando antes del lavado cumpla con los requisitos para ser empleada en el amasado.

- **Partículas en suspensión**

El agua que contiene muchos sólidos en suspensión debe dejarse asentar antes de ser utilizada, debido a que no es conveniente añadir cantidades grandes de limo o partículas de menor tamaño. Para el agua de mezcla se tiene un límite de 2.000 ppm de sedimentos o arcillas suspendidas, porque contenidos superiores pueden incrementar la demanda de agua, la contracción por secado o causar eflorescencias. Las aguas con lodos deberán dejarse sedimentar en tanques de decantación antes de su uso.

- **Sólidos disueltos**

El agua que contiene menos que 2.000 ppm de sólidos disueltos puede en muchos casos ser utilizada, sin embargo, esto depende de la naturaleza del material disuelto. Es así, que sulfito de sodio en cantidades superiores a 100 ppm, cloruro en más 500 ppm, carbonatos en más de 1.000 ppm, pueden causar problemas al concreto.

La cantidad de partículas en suspensión y sólidos disueltos presentes, causan diferentes efectos sobre el concreto y son función de la fuente de donde provienen, razón por la cual, es importante tener presente los efectos de las aguas que a continuación se enumeran.

Agua de mar

El agua de mar está principalmente compuesta de sulfatos y cloruros de sulfato y magnesio, tal como se aprecia en la tabla 4.1. Tiene una salinidad de 3.5 % (34.000 ppm de sales disueltas), lo cual hace que se afecten los tiempos de fraguado y que se produzca una resistencia temprana mayor, pero a largo plazo menor. Por lo general no son importantes los efectos sobre el fraguado, siempre y cuando la pérdida de resistencia sea inferior al 15 %. El agua con grandes cantidades de cloruro tiende a causar humedad persistente, eflorescencia y descascaramientos en la superficie del concreto, por consiguiente, el agua de mar no se deberá emplear en casos arquitectónicos, en que sea importante la apariencia.

En el concreto reforzado, el agua de mar aumenta el riesgo de corrosión del acero de refuerzo, por lo que en la práctica no es recomendable utilizarla en la mezcla. Sin embargo, en los casos en que sea imposible evitar su utilización es necesario proteger la armadura con recubrimientos y utilizar concretos densos para evitar los problemas de corrosión.

El agua de mar ha sido utilizada en concretos masivos con resultados aceptables en resistencias, dentro del límite del 85% anotado anteriormente, pero el mayor problema ha ocurrido cuando el agua contiene algas u otras impurezas orgánicas.

Tabla 4.1. Composición típica del agua de mar

COMPUESTO	ppm
Cloruro de Sodio ($NaCl$)	27.000
Cloruro de Magnesio ($MgCl_2$)	3.200
Sulfato de Magnesio ($MgSO_4$)	2.200
Sulfato de Calcio ($CaSO_4$)	1.100
Cloruro de Calcio ($CaCl_2$)	500
Total sales disueltas	34.000

Aguas con impurezas orgánicas o algas

Aguas coloreadas generalmente indican la presencia de material orgánico disuelto, el cual, al igual que la presencia de algas en el agua de mezcla, tiende a generar una gran inclusión de aire y reducción de adherencia, con la consecuente pérdida de las resistencias mecánicas.

Aguas con azúcar

La presencia de azúcar en pequeñas cantidades 0,03 % - 0,15 %, por masa de cemento, en el agua de mezcla generalmente retarda el fraguado del cemento. Cuando la concentración se incrementa al 0,2 % por de cemento, el fraguado generalmente se acelera y si se incrementa a 0,25 % o más, puede causar fraguado rápido y una sustancial reducción de resistencia a 28 días. Cuando es menos de 500 ppm de azúcar en la mezcla, generalmente no tienen efecto adverso sobre la resistencia del concreto, pero al exceder esa cantidad, deberá probarse el tiempo de fraguado y la resistencia.

Aguas ácidas

Las aguas que contengan ácidos inorgánicos comunes, tales como el clorhídrico o el sulfúrico, en concentraciones inferiores a 10 000 ppm no tienen efectos adversos en la resistencia del concreto. Sin embargo aguas naturales que contengan ácidos orgánicos, tales como, el húmico, son peligrosas para su elaboración, ya que pueden atrapar grandes cantidades de aire y ejercer efectos adversos sobre el endurecimiento. Se debe evitar las aguas ácidas con valores de pH inferiores a 3.

Tabla 4.2. Concentración tolerable de impurezas en agua de mezcla (13)

TIPO DE IMPUREZA	VALOR MÁXIMO RECOMENDADO
Acidos inorgánicos (ácido sulfúrico)	10.000 ppm
Aceite mineral (por masa de cemento)	2 %
Aguas con algas	NO RECOMENDABLE
Agua de mar	
• Para concreto no reforzado	35.000 ppm
• Para concreto pretensado o reforzado	NO RECOMENDABLE
Agua sanitarias	20 ppm
Azúcar	500 ppm[3]
carbonato de calcio y magnesio	400 ppm
Carbonatos y bicarbonatos de sodio y potasio	1.000 ppm[3]
Cloruro de calcio	30.000 ppm
Cloruro de magneso	40.000 ppm
Cloruros:	
• Estructuras con bajo potencial de corrosión y condiciones secas	20.000 ppm
• Concreto pretensado	500 ppm
• Estructuras con elementos galvanizados y de aluminio	1.000 ppm
Hidróxido de potasio (por masa de cemento)	1.2 %
Hidróxido de sodio (por masa de cemento)	0.5 %
Partículas en suspensión	2.000 ppm
pH	6 - 8
Sales de hierro	40.000 ppm
Sales de magnesio, estaño, zinc, cobre y plomo	500 ppm
Sulfato de magnesio	25.000 ppm
Sulfato de sodio	10.000 ppm
Sulfito de sodio	100 ppm

Nota: El contenido máximo de iones combinados de calcio, magnesio, sodio, potasio, bicarbonato, sulfato, cloruro, nitrato y carbonato es de 20.000 ppm.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Aguas alcalinas

Aguas que tengan concentraciones de hidróxido de sodio de 0.5% en masa de cemento, no afectan las resistencia, siempre que no aceleren el fraguado; pero mayores concentraciones pueden reducir la resistencia. Para algunos cementos pueden permitirse aguas con concentración de hidróxido de potasio hasta de 1.2 % de la masa del cemento, valor que puede ser peligroso para otros cementos.

Por lo general, contienen unas 400 ppm de materia orgánica. Luego de diluidas en un buen sistema de tratamiento, la concentración se reduce aproximadamente a 20 ppm o menos, que no causa problemas al concreto.

En la tabla 4.2 se presenta un resumen de los valores máximos recomendados de concentraciones de impurezas en el agua de mezclado y en la tabla 4.3 están los efectos de las impurezas sobre las propiedades de concreto.

Tabla 4.3. *Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en el agua*

IMPUREZAS	FRAGUADO	ENDURECIMIENTO	EFLORESCENCIAS	CORROSIÓN	ADHERENCIA	EXPANSIÓN	AIRE INCLUIDO	HIDRATACIÓN
pH	X	X	----	----	----	----	----	----
Sustancias solubles	X	X	X	X	X	----	----	----
Sulfatos	X	X	X	X	X	X	----	----
Cloruros	X	X	X	X	X	----	----	----
Hidratos de carbono	X	X	----	----	X	----	----	----
Sustancias orgánicas solubles en éter	X	X	----	----	----	----	X	X

X: Causa efecto negativo ----: No causa efecto negativo

Ensayos sobre el agua

Con el objeto de evaluar la calidad del agua para la producción de concreto, se deben efectuar ensayos que permitan verificar que no se modifican ni el tiempo de fraguado ni la resistencia.

La verificación del tiempo de fraguado se realiza de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma NTC 118 o ASTM C191, empleando la aguja de Vicat y el criterio de aceptación es que éste no difiera en más de 30 min en relación a una muestra elaborada con agua destilada. La

resistencia se evalúa sobre unos cubos de mortero mezclados con agua destilada y otros elaborados con el agua en cuestión, siguiendo el procedimiento descrito en la norma NTC 220 y en la ASTM C109, la resistencia mínima de los cubos hechos con el agua problema debe ser el 90 % de la resistencia de los cubos elaborados con agua destilada. (Ver NTC 3459)

Si los valores obtenidos con el agua en prueba están por fuera de los límites, es posible que se cause perjuicio al concreto y por tanto se debe buscar otra fuente de suministro. Si la resistencia es menor al 90 %, pero superior al 80 % de la resistencia de los cubos de mortero testigo se debe contemplar la modificación de las proporciones de la mezcla.

También se acostumbra efectuar ensayos directamente sobre el agua para saber si es o no apta para la fabricación de concreto. Algunos ensayos normalmente especificados son los que se indican en la tabla 4.4.

Tabla 4.4. *Ensayos sobre el agua de mezclado para concreto (5)*

Tema	Norma NTC	Norma ASTM
Agua para la elaboración de concreto y mortero de cemento hidraúlico	3459	
Acidez y alcalinidad		D1067
Calcio y magnecio		D511
Cloruros	1623	D512
Definición de términos relativos de agua		D1129
Dureza	1604	
Partículas y materia disuelta en el agua		D1888
pH		D1293
Sulfatos	1603	D516
Turbiedad	881	

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1620
QUITO

AGREGADOS o ÁRIDOS

Capítulo 5

Generalidades

Los agregados son el mayor constituyente del concreto, generalmente componen más del 70 por ciento del material en un metro cúbico de concreto y son los que hacen que este sea un material económico de construcción. En la elaboración de concreto de masa normal, usado en la mayoría de construcciones, los agregados frecuentemente son obtenidos de arenas naturales y depósitos de grava. La fuente de materiales debe estar localizada a una distancia razonable del sitio de trabajo y para su selección hay que tener presente que sus propiedades difieren considerablemente de una a otra. Cada una puede variar en la mineralogía de sus componentes o las condiciones físicas de sus partículas, tales como, la distribución de tamaños, la forma y la textura. Todos estos factores tienen un efecto en el comportamiento del concreto.

Definición

Los agregados son cualquier sustancia sólida o partículas añadidas intencionalmente al concreto que ocupan un espacio rodeado por pasta de cemento, de tal forma, que en combinación con esta proporcionan resistencia mecánica, al mortero o concreto en estado endurecido y controlan los cambios volumétricos que normalmente tienen lugar durante el fraguado del cemento, así como los que se producen por las variaciones en el contenido de humedad de las estructuras.

La calidad de los agregados está determinada por el origen, por su distribución granulométrica, densidad, forma y superficie. Se han clasificado en agregado grueso y agregado fino, fijando un valor en tamaño de 4,76 mm a 0,075 mm para el fino o arena y de 4,76 mm en adelante para el grueso. Frecuentemente, la fracción de agregado grueso es subdividida dentro de rangos, tales como, 4,76 mm a 19 mm para la gravilla y de 19 mm a 51 mm para la grava. La selección del tamaño de agregado grueso para un concreto reforzado está en función del tipo de estructura y separación de la armadura.

Origen de los agregados naturales

Son producto de procesos naturales que involucran condiciones especiales de temperatura y presión, así como también, efectos de meteorización o intemperismo y erosión.

Estructura de la tierra

La división más simple de la estructura de la tierra se hace según la variación de las características físicas, tales como, densidad y estado, en cuatro grandes zonas, a saber:

La primera es el núcleo central, la cual casi con seguridad es sólida, no se conoce su composición, pero probablemente es ferro-níquel. La segunda está alrededor del núcleo central, probablemente compuesta también por ferro-níquel, pero tiene propiedades de líquido a alta temperatura. La tercera es el manto, que ocupa la mayor parte del volumen y está formado por

silicato de magnesio. El manto se conforma por tres capas que tienen diferentes propiedades físicas, la más importante de ellas es la denominada capa de baja velocidad, por cuanto permite una fácil exploración geofísica. La cuarta es la corteza de la tierra, la cual tiene un espesor que varía desde 65 km bajo las montañas hasta 5 km debajo del océano. Estas zonas se representan en forma diagramática en la figura 5.1.

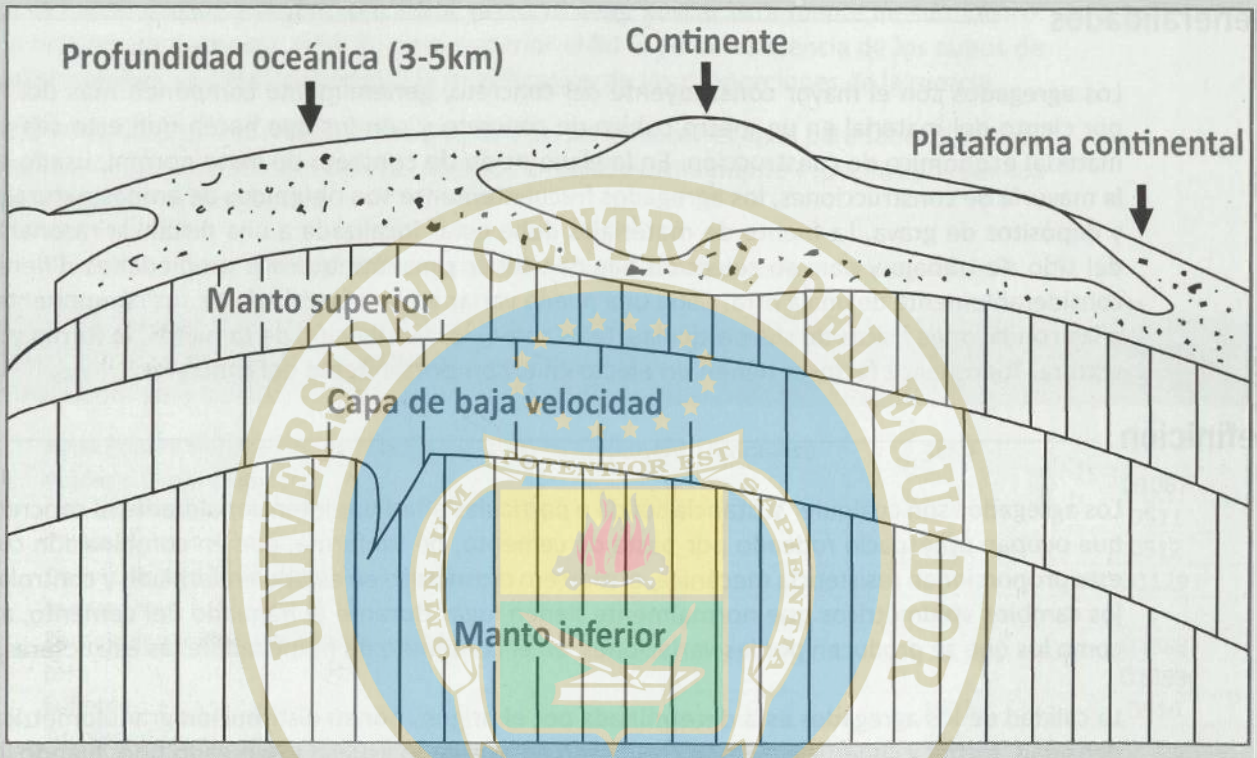


Figura 5.1. Estructura de la tierra

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM SCIENTIAE EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Estas divisiones no tienen igual espesor y el material que las conforma es de diferente densidad.

Ciclo de las rocas

La actividad en el interior de la tierra es mucho mayor a lo que se puede imaginar. A través de las eras geológicas, se han presentado cambios que son responsables de la formación y transformación de las rocas que se utilizan hoy en la elaboración de concreto.

Las rocas ígneas se han formado bajo la superficie terrestre a diferentes profundidades a partir del enfriamiento de una solución fundida. También se han fundido y se siguen formando en la actualidad por consolidación de lavas expulsadas sobre la superficie terrestre.

Cuando estas rocas aparecen en la superficie de la tierra por desgaste de los materiales que las cubren o por erupción volcánica, quedan expuestas en un medio completamente diferente de aquel en que se han formado y por acción de los agentes atmosféricos (agua, variación

de temperatura, oxígeno, anhídrido carbónico), se descomponen, proceso conocido con el nombre de me-teorización. A causa de este proceso, los materiales resultantes son movilizados por agentes de erosión (agua y hielo) hasta ser depositados y posteriormente consolidados, originándose así las rocas sedimentarias.

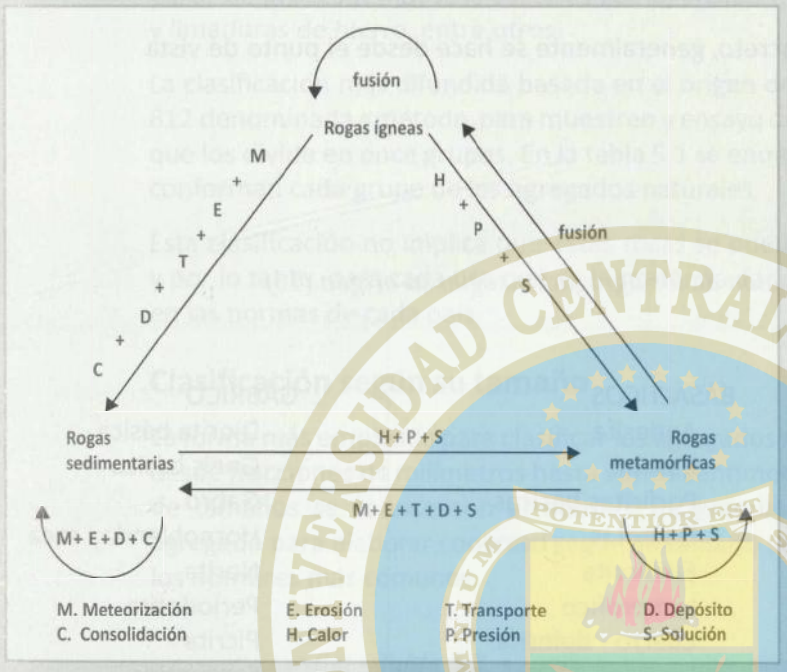


Figura 5.2 Ciclo de las rocas

Las rocas ígneas o las sedimentarias pueden quedar sometidas a temperaturas y/o presiones elevadas, sufriendo alteraciones y modificaciones en su estado sólido, dando origen a las rocas metamórficas. Las rocas sedimentarias pueden quedar expuestas a meteorización, erosión, transporte y acumulación, sus materiales pueden ser compactados y cementados, dando origen también a más rocas sedimentarias. Esta secuencia de fenómenos constituye lo que se denomina el ciclo de las rocas (ver figura 5.2).

- **Rocas ígneas**

Constituyen la mayor parte de la porción sólida de la tierra y de ellas, como quedó expuesto antes, se derivan los otros grupos de rocas. Estas se forman por el enfriamiento y solidificación del magma y dependiendo de la composición de éste se clasifican en: ácidas, intermedias y básicas. Según el lugar de formación se clasifican en: intrusivas y extrusivas o volcánicas. Las primeras se forman a gran profundidad y las segundas en la superficie.

- **Rocas sedimentarias**

Están compuestas de material que proviene de la desintegración y descomposición por meteorización y transporte, de las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Estos materiales son transportados por el agua y el viento a las zonas llamadas cuencas sedimentarias, y allí se depositan, se consolidan y cementan, de forma tal que adquieren coherencia.

- **Rocas metamórficas**

Proceden de la transformación de otras rocas sólidas preexistentes en un proceso que involucra altas temperaturas y presiones en el interior de la tierra.

Petrografía y mineralogía

La calidad de los agregados se puede evaluar mediante comparación con otros ya conocidos, cuando se realizan exámenes visuales y análisis litológicos. Las técnicas para ejecutar el análisis petrográfico se encuentran descritas en la norma ASTM C-295. Por otra parte, el carácter mineralógico de los agregados está dado por las características mineralógicas de la roca madre de

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

donde provengan y pueden ayudar a conocer mejor la calidad del material en una situación determinada. En este caso la norma ASTM C-294 describe los minerales más comunes de los agregados y los tres tipos de rocas ya mencionados.

Clasificación de los agregados

La clasificación de los agregados para concreto, generalmente se hace desde el punto de vista de su procedencia, tamaño y densidad.

Tabla 5.1. Clasificación de los agregados según su origen (13)

PORFIRÍTICO Apilita Dacita Felsita Granófiro Querátofiro Microgranito Pórfido Cuarzo - porfirita Reolita Traquita	BASÁLTICOS Andesita Basalto Porfiritas básicas Doleritas Epidiorita Lamprófico Cuarzo - dolerita Espilita	GÁBRICO Diorita básica Gneis básico Gabro Hornoblenda - roca Norita Periodotita Picrita Serpentina
GRANÍTICO Gneis Granito Granodiorita Granulita Pegmatita Cuarzo - diorita Sienita	ARENISCA Arcosa Grawaca Arenisca Tufa	ESQUISTOSO Filita Esquisto Pizarra Rocas fracturadas
PEDERNALIO Horsteno Pedernal	CALIZA Dolomita Caliza Mármol	CUARZOSO Arcilla refractaria y cuarcita cristalizada
HORNO FÉLSICO Rocas metamórficas, excepto mármol		AGREGADOS ARTIFICALES

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIAE SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Clasificación según su procedencia

Pueden ser naturales o artificiales. Los agregados naturales se obtienen de la explotación de depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de río), o glaciares (cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales. Los agregados artificiales son los que se obtienen a partir de procesos industriales, tales como, arcillas expandidas, escorias de alto horno, clinker y limaduras de hierro, entre otros.

La clasificación más difundida basada en el origen de los agregados, es la norma británica No. 812 denominada «método para muestreo y ensayo de agregados minerales, arenas y rellenos», que los divide en once grupos. En la tabla 5.1 se enumeran y se da información de las rocas que conforman cada grupo de los agregados naturales.

Esta clasificación no implica que estas rocas se puedan emplear para determinado propósito, y por lo tanto, para cada uso que se le pretenda dar es necesario realizar los ensayos descritos en las normas de cada país.

Clasificación según su tamaño

La forma más empleada para clasificar los agregados naturales es según su tamaño, el cual varía desde fracciones de milímetros hasta varios centímetros en sección transversal. La distribución de tamaños se conoce con el nombre de granulometría. La clasificación más general del agregado para elaborar concreto según su tamaño se muestra en la tabla 5.2 donde se indican los nombres más comunes.

Tabla 5.2. Clasificación según el tamaño (13)

Tamaño de las partículas en mm (Tamiz)	Denominación corriente	Clasificación como agregado para concreto
< 0,002	Arcilla	Fracción muy fina
0,002 - 0,074 (No.200)	Limo	
0,075 - 4,76 (No.200) - (No.4)	Arena	Agregado fino
4,76 - 19,1 (No.4) - (3/4")	Gravilla	Agregado grueso
19,1 - 50,8 (3/4") - (2")	Grava	
50,8 - 152,4 (2") - (6")	Piedra	
> 152,4 (6")	Rajón Piedra bola	

El contenido de arcilla y limo en una mezcla de concreto, es un factor que se debe limitar porque cuando hay un exceso de las mismas, hace que sean mayores los requerimientos de agua y pueden restar adherencia entre el agregado grueso y la pasta de cemento.

Clasificación según su densidad

Según la densidad, que es la propiedad que relaciona la cantidad de masa con el volumen que ocupa, se pueden clasificar tanto los agregados naturales como los artificiales y se hace en tres diferentes categorías, como se muestra en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Clasificación de los agregados según su densidad (13)

Clasificación del agregado	Masa unitaria aproximada (kg/m³) del agregado	Masa unitaria aproximada (kg/m³) del concreto	Variedades más comunes de agregados	Ejemplos de uso
LIVIANO	480 - 1300	13 - 100 500 - 1350	Pizarras expandidas esquistos, escoria, arcilla	Concretos livianos estructurales
NORMAL	1300 - 200	2000 - 2500	Arena, grava, piedra triturada, clinker, escoria de fundición	Obras en concreto en general arena, grava, piedra
PESADO	2000 - 5600	> 2500	Barrita, limonita, magnetita, limadura de acero, hematita	Concreto para macizos de anclaje, para protección contra radiaciones, etc.

Propiedades de los agregados

Las propiedades de los agregados dependen en gran parte de la calidad de la roca madre de la cual proceden, por lo que para su evaluación, el examen petrográfico es de gran utilidad. Sin embargo, es posible conocer sus propiedades por medio de ensayos de laboratorio, determinados por organismos normalizadores, tales como el ASTM.

Criterios para la elección de los agregados

Debido a que las propiedades de los agregados empleados en la elaboración de concreto afectan las características de este, es importante seleccionarlos cuidadosamente, teniendo en cuenta los siguientes puntos:

- Carácter del trabajo
- Condiciones climáticas
- Factores que afectan la durabilidad
- Economía

Carácter de trabajo: las condiciones que deben cumplir los agregados para presas de concreto, son diferentes a las que se usan para pavimentos en este material. En las presas, las propiedades importantes del agregado son las que tienen efecto en el contenido de agua de la mezcla y las propiedades térmicas del concreto resultante. En pavimentos, la resistencia a la flexión es lo más importante por lo cual la forma de las partículas toma mayor significado. La eficiencia de los sistemas de colocación depende también de las propiedades de los agregados.

Condiciones climáticas: especial atención se le debe prestar a la mineralogía y solidez de los agregados usados en concreto colocado en medios ambientes agresivos, con el objeto de prevenir problemas de rompimiento o deterioración.

Factores que afectan la durabilidad: en condiciones de abrasión y erosión severas, son los agregados los que proporcionan la resistencia y no la matriz de cemento, por lo cual en estructuras hidráulicas o de drenaje, las características más importantes de ellos son la dureza, forma de partículas y granulometría.

Economía: los factores económicos que se deben considerar en la selección de los agregados son:

- Efecto del costo del agregado sobre el precio del concreto basado en la calidad del agregado.
- Efecto del agregado sobre los costos de construcción asociado con la facilidad y velocidad de colocación.
- Costo de juntas u otras medidas de diseño necesarias basadas en las propiedades del agregado y el concreto.
- Costo de mantenimiento y reparaciones de acuerdo con la velocidad en que un concreto con diferentes agregados se deteriora en un determinado medio ambiente.
- Uso de concreto de "menor calidad" donde la "poca calidad" podrá proporcionar adecuada durabilidad.

Toma de muestras y recepción del producto

Los ensayos para determinar las propiedades de un lote recibido o en existencia de agregado, se practican sobre pequeñas muestras, que deben ser representativas de la totalidad de los agregados, razón por la cual se tienen que tomar precauciones que permitan afirmar, con cierto grado de confianza, que las propiedades de la pequeña muestra son las que presenta el resto de los agregados.

El muestreo se define como la operación de remoción de una parte, conveniente en tamaño para el ensayo, de un todo que es de un volumen mucho más grande, de forma tal que la proporción y distribución de las calidades a ser ensayadas son las mismas en la parte removida y el volumen total.

La norma NTC 129 y ASTM D75 expone algunas técnicas para el muestreo que son efectivas para asegurar que las muestras de ensayo de agregados sean representativas del suministro de volumen del cual son obtenidas. Ya que las condiciones de almacenamiento del agregado y los medios por los cuales se pueden obtener las muestras varían, se presentan varias formas para muestreo.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SCIENTIARUM
FUNDADA EN 1620
QUITO
SIB - UCE

De igual importancia para obtener muestras no sesgadas, representativas, es asegurar que el manejo y envío de las muestras se lleve a cabo de manera que no ocurra la contaminación o degradación de las calidades del material y que la identificación de las muestras se mantenga todo el tiempo.

En ocasiones, se vuelve necesario muestrear materiales para agregados en condiciones no cubiertas por la norma NTC 129 y ASTM D75. Cuando se encuentran estas condiciones, todas las partes (incluyendo el productor) deben reunirse y acordar el plan de muestreo a ser empleado. En cualquier caso, es importante que el técnico tenga siempre presente que la muestra debe ser representativa y tome algunas precauciones para que los resultados de los ensayos tengan un alto grado de confianza. Un ejemplo de un procedimiento cuidadoso consiste en usar un cucharón en lugar de una pala, para evitar que partículas de algunos tamaños se caigan al levantar la pala.

La muestra principal está compuesta por varias porciones, tomadas de diferentes partes del todo. El número mínimo de estas partes, llamadas incrementos, es de 10 y su masa combinada no debe ser menor que las cantidades de la tabla 5.4, para partículas de diferente tamaños. No obstante, si la muestra es variable o está segregada, se deberán tomar más incrementos y, por consiguiente, la muestra será mayor.

Tabla 5.4. Masas mínimas de las muestras para ensayos (5)

Tamaño máximo mm	Masa mínima de la muestra kg
< 5	13
5 - 25	25
> 25	50

Formación de la muestra para el laboratorio

Como se puede apreciar en la tabla 5.4, la muestra principal puede ser bastante grande, especialmente cuando es necesario conocer las propiedades del agregado grueso, de modo que es necesario reducirla antes del ensayo. En todas las etapas de reducción es preciso retener el carácter representativo de la muestra, con el objeto de que la ensayada, tenga las mismas propiedades de la principal y en consecuencia, las del agregado general.

Existen tres formas de reducir el tamaño de la muestra, cada una de las cuales, resulta de la división de esta en partes similares: (1) partición por cuartos, (2) partición por mitades y (3) muestreo de pequeñas muestras. Las normas NTC 3674 y ASTM C702 describen los tres métodos.

Partición por cuartos: la muestra principal se mezcla hasta que tenga aspecto uniforme, en el caso de agregado fino se humedece para evitar la segregación. El material se amontona en forma de cono y a continuación se revuelve con una pala para formar de nuevo un cono. Esto se repite dos veces, depositando siempre el material en la cúspide del cono, de modo que la caída de partículas se distribuya uniformemente sobre la circunferencia de la base.

El siguiente paso consiste en aplanar el cono y dividirlo en cuartos. Se descartan dos opuestos, para que los otros dos formen la muestra, o, si todavía es demasiado, se reduce mediante una nueva repartición. Es importante hacerlo cuidadosamente para que todo el material fino quede incluido en el cuarto correspondiente.

Partición por mitades: la reducción de la muestra mediante este proceso requiere de un aparato, el cual consiste en una caja con divisiones verticales paralelas, con descargas alternadas a la izquierda y a la derecha. Las dos mitades se recogen en dos cajas colocadas bajo las salidas a cada lado. Se descarta una mitad y la otra se somete al mismo proceso hasta que la muestra se reduzca al tamaño deseado.

Dos situaciones son importantes de considerar: 1) el proceso mecánico de vertido y movi-miento del agregado puede causar una pérdida de polvo y por lo tanto el agregado fino debe ser llevado a la condición saturada y superficialmente seca antes de la reducción, 2) las muestras con relativamente pocos agregados grandes y aquellas en que predomina la presencia de un solo tamaño pueden no ser reducidas por este método debido a la imposibilidad de obtener una muestra representativa. En tales casos, puede ser necesario ensayar la muestra entera con el fin de obtener información válida.

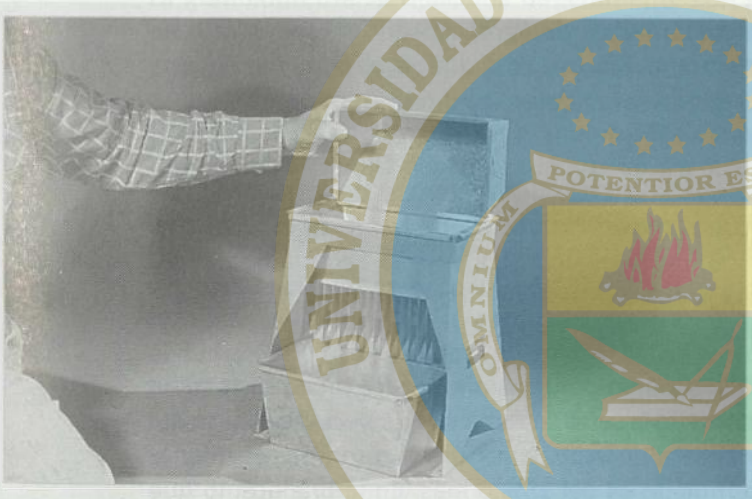


Figura 5.3. Cuarteador de agregados

Muestreo de pequeñas muestras: este método sólo se utiliza para muestras de arena saturada y consiste en seguir los pasos iniciales de cuarteo para formar un cono, el cual es aplanado con la pala hasta lograr un espesor y diámetro uniforme, de forma tal que cada cuadrante contenga una muestra representativa del material. La muestra se obtiene seleccionando y extrayendo con una cuchara por lo menos 5 porciones de material aleatoriamente de diferentes lugares de la pila miniatura.

Propiedades químicas

Las exigencias químicas que se deben hacer a los agregados para evitar su reacción en la masa del concreto, son las de evitar sustancias presentes agresivas y componentes geológicos o mineralógicos agresivos, entre los cuales el más frecuente parece ser la sílice activa.

- **Epitaxia**

La única reacción química favorable de los agregados, conocida hasta el momento, es la llamada epitaxia. Da mejor adherencia entre ciertos agregados calizos y la pasta de cemento, a medida que transcurre el tiempo.

- **Reacción álcali-agregado**

La sílice activa, presente en algunos agregados, reacciona con los álcalis del cemento produciendo expansiones, destrucción de la masa y pérdida de características resistentes. Las rocas que por lo general la contienen son las silíceas, como el pedernal (con ópalo y/o calcedonia), calizas y

dolomitas; y las volcánicas ácidas e intermedias, como las riolitas, latitas, dacitas, andesitas y sus respectivas tobas.

Para detectar la presencia de sílice activo en los agregados, es necesario efectuar ensayos de reactividad potencial por el método químico descrito en la norma NTC 175 y en la ASTM C289, el ensayo de expansión del mortero por el método de barras descrita en la norma ASTM C227 o por la de reactividad potencial a los álcalis que se describe en la norma ASTM C586, las cuales deben ir acompañadas de un detallado análisis petrográfico de acuerdo a la norma ASTM C295.

Propiedades físicas

Las propiedades físicas que tienen mayor importancia en el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto son: granulometría o gradación, densidad, porosidad, masa unitaria y forma y textura de las partículas.

- **Granulometría o gradación**

Es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregado en una muestra. Esta proporción se suele indicar, de mayor a menor tamaño, por una cifra que representa, en peso, el porcentaje parcial de cada tamaño que pasó o quedó retenido en los diferentes tamices que se usan obligatoriamente para tal medición.

Para obtener un buen concreto, es necesario que la mezcla de la arena y de la piedra logre una granulometría que proporcione masa unitaria máxima, puesto que con esta condición el volumen de los espacios entre partículas es mínimo y por consiguiente la cantidad de pasta necesaria para pegarlas y para llenar los espacios entre ellas será mínimo, lo cual dará lugar a una mezcla de mejores condiciones técnicas y además, económica.

El tamaño de un agregado se define mediante el empleo de un tamiz de referencia. El tamaño máximo corresponde a la abertura del menor tamiz de la serie de tamices que permite el paso del 100 % del material y el tamaño máximo nominal es el de la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más. En la práctica, lo que indica el tamaño máximo nominal es el tamaño promedio de partículas más grandes que hay dentro de la masa del agregado. La mayor utilidad de este factor con respecto al anterior, estriba en que el tamaño máximo nominal define mejor el tamaño de las partículas más grandes de la masa de agregados en su fracción gruesa, mientras que el tamaño máximo sólo indica el tamaño de la partícula más grande que hay en la masa, la cual en algunos casos puede ser única.

El tamaño máximo nominal de la piedra que se va a usar para fabricar concreto tiene importancia porque se relaciona con la facilidad y posibilidad de llenar los moldes o encofrados y porque se relaciona con la resistencia del concreto.

En primer término se entiende que una masa que contiene piedras muy grandes puede llegar al caso de que estas llenen toda la sección o gran parte de ella, o que no puedan pasar entre las varillas. Por eso, tales condiciones geométricas dominan la decisión sobre el tamaño permisible, exigiéndose como tamaño máximo la quinta parte de la dimensión menor entre los lados de la formaleta, o un tercio de la profundidad de las losas, o los tres cuartos de la separación de las varillas más cercanas, la menor de las tres condiciones. La otra razón es su influencia sobre la resistencia.

Como el tamaño máximo no puede definir de manera garantizada una granulometría, el valor numérico de este en tecnología de concreto casi no se usa. Razón por la cual, si no se dice lo

contrario, cuando se hable de tamaño máximo en las especificaciones granulométricas, se debe trabajar con el tamaño máximo nominal.

La experiencia en el conocimiento de granulometrías de materiales ha llevado al plan-teamiento de índices recomendados, dando origen así a las «curvas» o a las «zonas» de granulometría ventajosas. Estas indicaciones sirven para seleccionar materiales que ofrecen ventajas de comportamiento desde el punto de vista de la gradación. Con materiales que tengan curva de gradación diferente en algo a los índices recomendados, se puede llegar a obtener una mezcla. Esto permite emplear, en la mayoría de los casos, los agregados de cualquier zona geográfica donde se esté trabajando, aunque en ocasiones se llegue a hacer imprescindible mezclar tres tipos de agregados (grueso, medio y fino) para obtener una aceptable granulometría de la mezcla.

Lo importante es emplear agregados que mantengan constante su curva granulométrica, a través de los sucesivos despachos de material, evitando con ello cambios sorpresivos o bruscos en el comportamiento de la mezcla.

La granulometría se relaciona directamente con la facilidad de colocación del concreto, y con las resistencias mecánicas a través de las diferentes posibilidades de densidad o compacidad, aunque el acomodo de las partículas en la mezcla no sólo depende de ella, sino de la forma y textura de los granos. La granulometría que garantiza la máxima densidad, no permite buena manejabilidad en estado fresco, y la granulometría de la arena, tiene mucha mayor influencia sobre la trabajabilidad que la del agregado grueso, en razón de su mayor valor de superficie específica.

Se discute mucho acerca de las ventajas y desventajas de las granulometrías continuas (que tienen material retenido en cada tamiz sucesivo de ensayo), y las discontinuas (donde solo algunos tamices retienen material). Desde el punto de vista de las resistencias a la compresión, mezclas de gradación discontinuas, pero bien estudiadas, ofrecen elevadas resistencias. Desde el punto de vista de la trabajabilidad, el exceso de retención en uno o varios tamices hace que las mezclas se comporten como si no tuvieran suficiente pasta, por lo cual algunas especificaciones recomiendan no emplear agregados que retengan en algún tamiz más del 40%. En todo caso, se obtiene mejor trabajabilidad cuando, por encima de las recomendaciones granulométricas y de proporción de los agregados en total, se abusa ligeramente de cierto contenido de pasta cementante.

Granulometrías continuas tendiendo a los finos exigen mayores contenidos de agua y de cemento. Granulometrías continuas tendiendo a los gruesos tienen inclinación a las segregaciones.

Análisis granulométrico

La operación de separar una masa de agregado en fracciones de igual tamaño, consiste en hacerla pasar a través de una serie de tamices o cedazos, que tienen aberturas cuadradas y cuyas características deben ajustarse a la norma NTC 32.

La denominación de los tamices antes se realizaba teniendo en cuenta el tamaño de la abertura en pulgadas para los grandes y por el número de aberturas por pulgada lineal para tamices menores de 1/8 de pulgada. De tal manera, que por ejemplo el tamiz No.200 tiene 200 x 200 huecos dentro de una pulgada cuadrada con abertura de 0.074 mm cada uno. Hoy en día, la designación de tamices se hace de acuerdo con la abertura de la malla, medida en milímetros o en micras.

La serie general de tamices se basa teóricamente en que la abertura de un tamiz está en relación $1:\sqrt[4]{2}$ con respecto al siguiente tamiz. Sin embargo, hoy en día, la serie completa está dada por la serie R 40/3 de la ISO (International Standards Organization).

La norma NTC 32, incluye algunos tamices intermedios que no cumplen la relación 1:$\sqrt[4]{2}$ pero se emplean con alguna frecuencia para evitar intervalos muy grandes entre dos tamices consecutivos. Esta serie se indica en la tabla 5.5.

Para fines prácticos, la serie de tamices que se emplea en agregados de concreto se ha establecido, de manera que la abertura de cualquier tamiz es aproximadamente la mitad de la abertura del inmediatamente superior. Esto es una relación 1:2, la cual fue establecida por primera vez por Abrams, en el juego de tamices americano Tyler. Esta se indica en la tabla 5.6 y de manera análoga a la anterior, se incluyen algunos tamices que no cumplen la relación 1:2 pero que son de uso frecuente para determinar mejor la granulometría de un agregado en su parte gruesa.

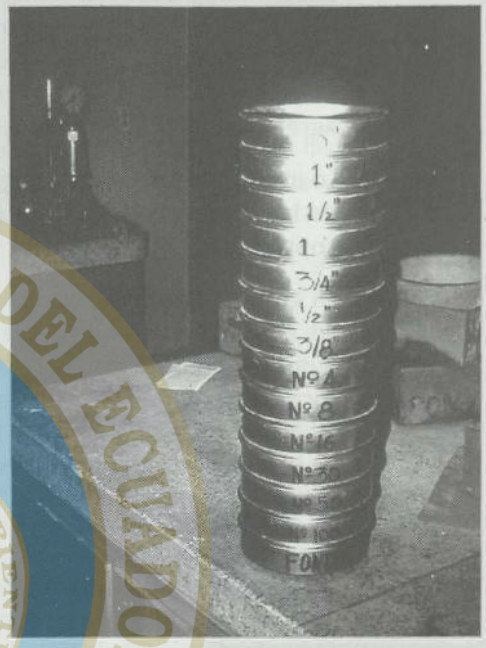


Figura 5.4 Serie de tamices para agregados de concreto

La operación de tamizado, debe ejecutarse de acuerdo con la norma NTC 77 y ASTM C136 en la cual se describen el tamaño de la muestra a ensayarse y los procedimientos adecuados para realizar el análisis. Los resultados de este generalmente se expresan en forma tabulada, como se muestra en la tabla 5.7.

Columna (1) Se indica la serie de tamices deseada, en orden descendente. (En la tabla 5.7 se indican algunos a manera de ejemplo).

Columna (2) Se indica la masa retenida en cada tamiz Xi.

Columna (3) Cada valor Xi de la columna (2) se expresa como un porcentaje de masa total de la muestra Xt de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Yi = \frac{Xi}{XT} \times 100$$

Columna (4) Se muestra el acumulado de los porcentajes retenidos en cada tamiz de acuerdo con la siguiente expresión:

$$Zi = Yi$$

De tal manera que, por ejemplo Z1 = Y1,Z2, = Y1 + Y2, Z3 = Y1 + Y2, + Y3, y así sucesivamente hasta llegar a Zn = 100%.

Columna (5) con base en el porcentaje retenido acumulado en cada tamiz se puede determinar el porcentaje acumulado que pasa también por cada tamiz. Como el porcentaje retenido acumulado es el complemento para llegar al 100% del porcentaje que pasa, este último fácilmente se determina según la siguiente expresión:

$$ti = 100 - Zi$$

Tabla 5.5. Denominación y abertura de tamices (13)

Denominación del Tamiz	Designación I.S.O.	Designación NTC equivalente		Antigua designación ASTM Equivalente
		Normal	Alterno	
150 mm	--	--	--	6"
125 mm	--	--	--	5"
106 mm	--	107,6 mm	4,24"	4,24"
*	--	101,6 mm	4"	--
90 mm	--	90,5 mm	3 ½"	3 ½"
75 mm	--	76,1 mm	3"	3"
63 mm	--	64,0 mm	2 ½"	2 ½"
53 mm	--	53,8 mm	2,12"	2,12"
*	--	50,8 mm	2"	2"
45 mm	--	45,3 mm	1,¾"	1, ¾"
37,5 mm	--	38,1 mm	1 ½	1, ½"
31,5 mm	--	32,0 mm	1 ¼	1"
26,5 mm	--	26,9 mm	1,06"	1,06"
*	--	25,4 mm	1"	1"
22,4 mm	22,4 mm	22,6 mm	⅞"	⅞"
19,0 mm	--	19,0 mm	¾"	¾"
16,0 mm	16,0 mm	16,0 mm	⅝"	⅝"
13,2 mm	--	13,5 mm	0,53"	0,53"
*	--	12,7 mm	½"	--
11,2 mm	11,2 mm	11,2 mm	7/16"	7/16"
9,5 mm	--	9,51 mm	⅜"	⅜"
8,0 mm	8,0 mm	8,00 mm	5/16"	5/16"
6,7 mm	--	6,73 mm	0,265"	0,265"
*	--	6,35 mm	¼"	--
5,6 mm	5,6 mm	5,66 mm	Nº 3 ½	Nº 3 ½
4,75 mm	--	4,76 mm	Nº 4	Nº 4
4,00 mm	4,00 mm	4,00 mm	Nº 5	Nº 5
3,35 mm	--	3,36 mm	Nº 6	Nº 6
2,80 mm	--	2,83 mm	Nº 7	Nº 7
2,36 mm	--	2,38 mm	Nº 8	Nº 8
2,00 mm	2,00 mm	2,00 mm	Nº 10	Nº 10
1,70 mm	--	1,68 mm	Nº 12	Nº 12
1,40 mm	1,40 mm	1,41 mm	Nº 14	Nº 14
1,18 mm	--	1,19 mm	Nº 16	Nº 16
1,00 mm	1,00 mm	1,00 mm	Nº 18	Nº 18
850 µm	--	841 µm	Nº 20	Nº 20
710 µm	710 µm	707 µm	Nº 25	Nº 25
600 µm	--	595 µm	Nº 30	Nº 30
500 µm	500 µm	500 µm	Nº 35	Nº 35
425 µm	--	420 µm	Nº 40	Nº 40
355 µm	355 µm	345 µm	Nº 45	Nº 45
300 µm	--	297 µm	Nº 50	Nº 50
250 µm	250 µm	250 µm	Nº 60	Nº 60
212 µm	--	210 µm	Nº 70	Nº 70
180 µm	180 µm	177 µm	Nº 80	Nº 80
150 µm	--	149 µm	Nº 100	Nº 100
125 µm	125 µm	125 µm	Nº 120	Nº 120
106 µm	--	105 µm	Nº 140	Nº 140
90 µm	90 µm	88 µm	Nº 170	Nº 170
75 µm	--	74 µm	Nº 200	Nº 200
63 µm	63 µm	63 µm	Nº 230	Nº 230
53 µm	--	53 µm	Nº 270	Nº 270
45 µm	45 µm	44 µm	Nº 325	Nº 325
38 µm	--	37 µm	Nº 400	Nº 400

Nota: * Tamices que no cumplen con la relación 1:$\sqrt[4]{2}$

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTESTATEM EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Tabla 5.6. Serie de tamices más usuales en agregados para concreto (13)

Denominación del tamiz equivalente	Designación NTC	Antigua designación ASTM equivalente
150.0 mm	--	6"
* 125.0 mm	--	5"
* 112.0 mm	--	4 ½
* 110.0 mm	101.6	4"
* 90.0 mm	90.5	3 ½"
75.0 mm	76.1 mm	3"
* 50.8 mm	50.8	2"
37.5 mm	38.1 mm	1 ½"
* 26.5 mm	25.4 mm	1"
19.0 mm	19.4 mm	¾"
* 13.2 mm	12.7 mm	½"
9.5 mm	9.51 mm	⅜
4.75 mm	4.76 mm	No.4
2.36 mm	2.38 mm	No.8
1.18 mm	1.19 mm	No. 16
600 mm	595 mm	No. 30
300 mm	297 mm	No. 50
150 mm	149 mm	No. 100
75 mm	74 mm	No. 200

Nota: * Tamices que no cumplen con la relación 1:2

Tabla 5.7. Determinación de la granulometría de agregados para concreto (13)

Tamiz mm (1)	Tamiz pulg. (1)	Masa retenida gramos (2)	% Retenido (3)	% Retenido (4)	% Pasa (5)
38.1	1 ½	X1	Y1	Z1	t1
25.4	1	X2	Y2	Z2	t2
19.0	¾	X3	Y3	Z3	t3
12.7	½	X4	Y4	Z4	t4
9.51	⅜	X5	Y5	Z5	t5
4.76	No.4	X6	Y6	Z6	t6
Fondo		X7	Y7	100%	t7
Total		XT	100%		

El porcentaje acumulado que pasa es el que se utiliza para representar gráficamente las curvas de granulometría.

Curvas de granulometría o gradación

En el ensayo para conocerla, se toman los datos numéricos de los porcentajes en masa que pasan por cada uno de los tamices y para mayor facilidad de compresión, comúnmente se presentan de manera gráfica mediante la curva de granulometría o línea de cribado.

En la gráfica de granulometría, sobre el eje de las ordenadas se representa el porcentaje acumulado que pasa a través de los tamices en escala aritmética. Sobre el eje de las abscisas se indican las aberturas de los tamices, generalmente en escala logarítmica y algunas veces en escala aritmética. Dando así origen a lo que se denomina curva granulométrica del material, como se ilustra en la figura 5.5.

La línea quebrada que une los puntos de la curva granulométrica, es un medio identificativo del material y de su composición, de tal forma que es posible deducir, por la experiencia de los casos anteriores, toda una serie de propiedades.

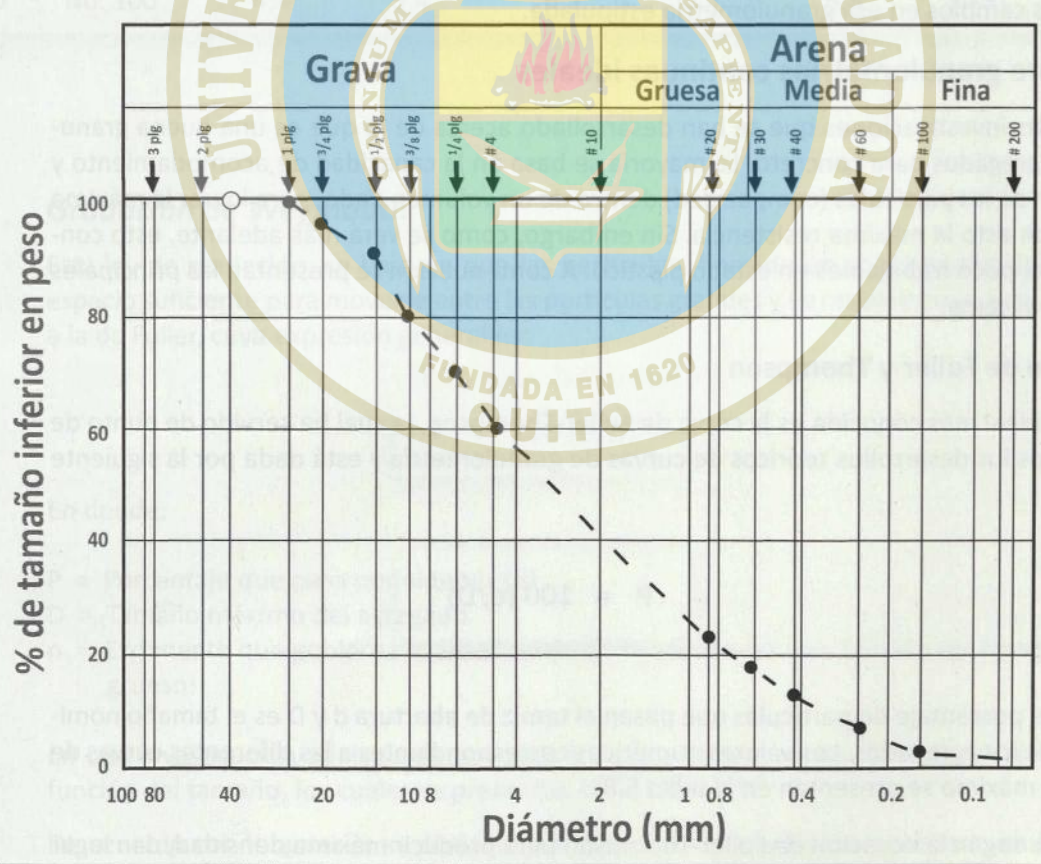


Figura 5.5. Curva granulométrica

Módulo de finura

Es un índice, para determinar características granulométricas de los agregados. Se acostumbra a usar en referencia a las arenas, aunque su principio teórico se extiende a cualquier material granular. Este módulo fue inicialmente sugerido por el ya legendario Abrams.

El módulo de finura se define como el número que se obtiene al dividir por 100 la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie normalizada. El valor de este módulo es mayor, cuando el agregado contiene granos más gruesos y decrece cuando el agregado disminuye de tamaño. Se interpreta, como la indicación del tamiz en que, supuestamente, quedaría retenido o pasaría el 50% del material.

Para ello se debe dar el N° 1 al tamiz menor, y luego ir haciendo crecer ese número, que será al módulo de finura, conforme se van sucediendo los variados tamices mayores de la serie que se esté empleando. Como se puede comprender, conocer el módulo de un material no da una idea de la granulometría del mismo, sino la relación a un tamiz intermedio donde se cumple la condición citada. Por esa razón, puede haber agregados de una granulometría muy diferente y tener todos ellos el mismo módulo de finura. El uso de este índice de calidad tiene mayor aplicación en aquellos casos en que los agregados que se estén usando cuenten con una aceptable garantía de que sus granulometrías, al momento de la venta, cumplen con alguna especificación convenida. En tal caso, ligeras modificaciones del valor de módulo puede servir para detectar también otros cambios en esa granulometría estipulada.

Teorías sobre granulometrías continuas ideales

Muchas son las investigaciones que se han desarrollado acerca de lo que es una buena granulometría de agregados para concreto. La mayoría se basa en la capacidad de acomodamiento y compactación de las partículas (compacidad) dentro de un volumen dado, para lograr la máxima densidad y con esto la máxima resistencia. Sin embargo, como se verá más adelante, esto conduce a mezclas poco trabajables en estado plástico. A conti-nuación se presentan las principales teorías sobre el tema:

- **Gradación de Fuller y Thompson**

La gradación ideal más conocida es la curva de Fuller-Thompson, la cual ha servido de punto de partida a todos los desarrollos teóricos de curvas de granulometría y está dada por la siguiente ecuación:

$$P = 100\,(d/D)^{1/2}$$

Donde, P es el porcentaje de partículas que pasan el tamiz de abertura d y D es el tamaño nominal máximo de los agregados. Los valores numéricos correspondientes a las diferentes curvas de cada tamaño máximo se presentan en la tabla 5.8.

Los agregados según la ecuación de Fuller-Thompson para producir máxima densidad, dan lugar a mezclas ásperas y poco manejables en estado plástico, debido a la falta de finos, en especial para concretos con bajo contenido de cemento, pero con frecuencia se usa debido a su simplicidad y a que produce buenos resultados.

Tabla 5.8. Gradaciones ideales Fuller - Thompson de agregados para concreto en porcentaje que pasa (13)

Tamiz		Tamaño máximo mm (pulg.)						
mm	pulg	76,1 (3")	50,8 (2")	38,1 (1 ½")	25,4 (1")	19,0 (¾")	12,7 (½")	9,51 (⅜")
76,1	3	100,0						
50,8	2	81,6	100,0					
38,1	1 ½	70,7	81,6	100,0				
25,4	1	57,8	70,7	81,6	100,0			
19,0	¾	50,0	61,2	70,7	81,6	100,0		
12,7	½	40,9	50,0	57,8	70,7	81,6	100,0	
9,51	⅜	35,4	43,3	50,0	61,2	70,7	87,2	100,0
4,76	No. 4	25,0	30,6	35,0	43,3	50,0	61,2	70,8
2,38	No. 8	17,7	12,6	25,4	30,6	53,4	43,3	50,0
1,19	No. 16	12,5	15,3	17,7	21,6	25,0	30,6	35,4
0,600	No. 30	8,8	10,8	12,5	15,3	17,7	21,6	25,0
0,300	No. 50	6,2	7,7	8,8	10,8	12,5	15,3	17,0
0,150	No. 100	4,4	5,4	6,2	7,7	8,8	10,8	12,6

Gradación de Weymouth

Esta ley de gradación, se basa en que las partículas finas de un solo tamaño deben tener un espacio suficiente para moverse entre las partículas grandes y se resume en una ecuación similar a la de Fuller, cuya expresión general es:

$$P = 100\,(d/D)^{n}$$

En donde:

P = Porcentaje que pasa por el tamiz (d)
D = Tamaño máximo del agregado
n = Exponente que gobierna la distribución de las partículas y es función del agregado grueso

En una investigación adelantada por Juan F. García Balado, se dan los valores de n como una función del tamaño, los cuales se presentan en la tabla 5.9.

De acuerdo con lo anterior se obtienen las granulometrías ideales mostradas en la tabla 5.10. Sin embargo, se ha observado que estas gradaciones dan lugar a mezclas con excesos de finos (pastosas), por lo cual requieren de un alto contenido de agua y cemento para una misma resistencia.

Tabla 5.9. *Valores de n para la ecuación de Weymouth en función del tamaño d (13)*

Tamaño d (mm)	76.1	38.1	19.1	9.5	> 4.76
n	0.230	0.268	0.292	0.304	0.305

Tabla 5.10. *Gradaciones ideales de Weymouth para agregados en porcentaje que pasa (13)*

Tamiz		Tamaño máximo mm (pulg.)				
mm	pulg	76,1 (3")	50,8 (2")	38,1 (1 ½")	25,4 (1")	19,0 (¾")
76.1	3	100,0				
50.8	2	--	100.0			
38.1	1 ½	83,0	92.6	100.0		
25.4	1	--	--	--	100.0	
19.1	¾	66.7	75.2	81.6	91.7	100.0
9.51	⅜	53.0	60.1	65.6	74.1	81.0
4.76	No. 4	42.9	48.5	53.0	60.0	65.5
2.38	No. 8	34.8	39.4	42.9	48.5	53.0
1.19	No. 16	28.1	38.1	34.8	39.3	42.9
0.595	No. 30	22.8	25.8	28.1	31.8	34.8
0.297	No. 50	18.4	20.8	22.8	25.8	28.1
0.149	No. 100	14.9	16.9	18.4	20.8	22.8

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1620
QUITO

Otras teorías de gradación

La práctica ha demostrado que al tomar un valor de n = 0.5 se requiere de una mayor energía de compactación para lograr una alta masa unitaria y una alta resistencia. Es por ello, que se deben emplear valores sustanciales menores de n para lograr la más alta resistencia, con menor energía de compactación. En la figura 5.6, se puede apreciar que la más alta resistencia de un concreto en función de su granulometría se obtiene para un valor de n = 0.45, empleando métodos tradicionales de compactación. Por tales motivos, Sánchez De Guzmán, sugiere la siguiente expresión como curva ideal de gradación de agregados, en función de eliminar la aspereza, mejorar la manejabilidad y obtener la más altas resistencias en una mezcla de concreto.

$$P = 100\,(d/D)^{0.45}$$

Donde:

P = Porcentaje que pasa por el tamiz d
D = Tamaño máximo del agregado

La cual da un valor intermedio de n = 0.45 entre la máxima compacidad de los agregados solos (n = 0.4) y la de los agregados con cemento (n = 0.5) con métodos tradicionales de compactación. De acuerdo a lo anterior se obtienen las granulometrías ideales mostradas en la tabla 5.11.

Tabla 5.11. *Gradaciones ideales para agregados en porcentaje que pasa según Sánchez De Guzmán (13)*

Tamiz		Tamaño máximo mm (pulg.)						
mm	pulg	76,1 (3")	50,8 (2")	38,1 (1 ½")	25,4 (1")	19,0 (¾")	12,7 (½")	9,51 (⅜")
76,1	3	100,0						
50,8	2"	81,3	100,0					
38,1	1½	73,2	87,9	100,0				
25,1	1"	61,8	73,2	83,3	100,0			
19,0	¾"	53,6	64,3	73,2	87,9	100,0		
12,7	½"	44,7	53,6	61,0	73,2	83,3	100,0	
9,51	⅜"	9,2	47,1	53,6	64,3	73,2	87,2	100,0
4,76	No. 4	28,7	34,5	39,2	47,1	53,6	64,3	73,2
2,38	No. 8	21,0	25,2	28,7	34,5	39,3	47,1	53,6
1,19	No. 16	15,4	18,5	21,0	25,2	28,7	34,5	39,3
0,595	No. 30	11,3	13,5	15,4	18,5	21,0	25,2	28,7
0,297	No. 50	8,2	9,9	11,3	13,5	15,4	18,5	21,0
0,149	No. 100	6,0	7,3	8,3	9,9	11,3	13,5	15,4

La modificación que en su momento (1947) fue más aceptada y aún hoy en día tiene vigencia es la propuesta por Bolomey, la cual contempla un mayor contenido de finos dentro de la masa del agregado, (sin excesos como en la teoría de Weymouth), con el objeto de eliminar la aspereza y mejorar la manejabilidad de la mezcla de concreto en estado plástico. Esta modificación está dada en la siguiente expresión:

$$P = f+(100 - f) \times (d/D)^{1/2}$$

donde f es una constante empírica que indica el grado de trabajabilidad de una mezcla de concreto para una consistencia y una forma de las partículas determinada. Estos valores de f se presentan en la tabla 5.12.

Tabla 5.12. Valores de f para la expresión de Bolomey (13)

Formas de partículas de agregados	Consistencia del concreto en estado plástico		
	Seca	Normal	Húmeda
Redonda	6 - 8	10	12
Cúbica	8 - 10	12 - 14	14 - 16

Especificaciones de las curvas de granulometría

Como se observó anteriormente, la resistencia a la compresión del concreto totalmente compactado con una determinada relación agua/cemento, no es independiente de la granulometría del agregado. Para lograr una buena compactación cuando se encuentra en estado plástico, se requiere una adecuada manejabilidad sin segregación, que solo se obtiene con una granulometría tal que permita compactar la mezcla a la máxima densidad con un uso moderado de energía.

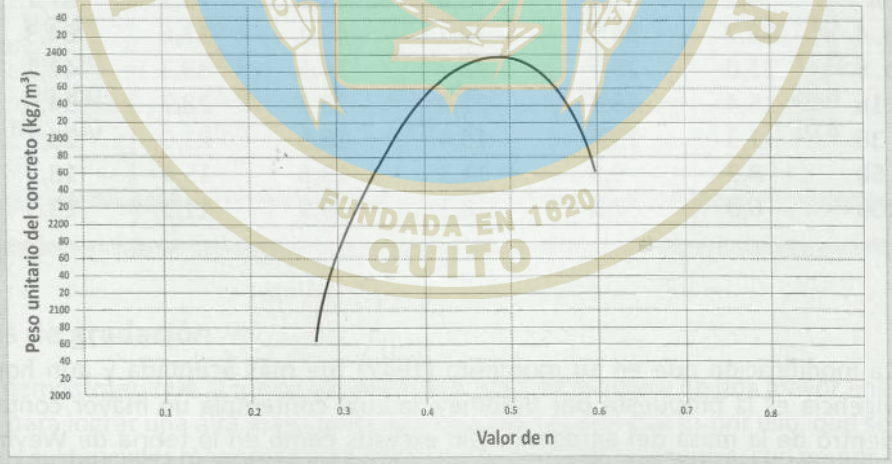


Figura 5.6. Curva de resistencia a la compresión del concreto en función de n (13)

En este punto, es conveniente anotar que las granulometrías ideales sólo existen a nivel teórico, difícilmente se puede reproducir en la práctica, de tal manera que una buena granulometría se refiere al aprovechamiento eficiente de condiciones técnicas y económicas para obtener el resultado deseado.

Para este efecto, casi todas las especificaciones granulométricas contemplan dos curvas. La primera, define el límite superior y la segunda el inferior, dentro de las cuales cualquier granulometría es buena. Las normas NTC 174 y ASTM C33, especifican un par de curvas límites para agregado fino, que deben utilizarse para concreto (no para mortero) y 10 pares de curvas para agregados gruesos según su tamaño máximo nominal.

En las tablas 5.13 y 5.14 se indican estas especificaciones. La gradación del agregado fino que se utiliza en morteros de mampostería está especificada en la norma NTC 2240 y es más fina que la de la arena utilizada en concreto, por razones obvias. Esta gradación se muestra en la tabla 5.15.

Tabla 5.13. Requisitos de granulometría de agregado fino para concreto según NTC 174 (ASTM C 33)

Tamiz		Porcentaje que pasa
mm	pulg.	%
9.51	3/8	100
4.76	No. 4	95 - 100
2.38	No. 8	80 - 100
1.19	No. 16	50 - 85
0.595	No. 30	25 - 60
0.297	No. 50	10 - 30
0.149	No. 100	2 - 10

Tabla 5.14. Requisitos de granulometría de agregado grueso para concreto según NTC 174 y ASTM C33

Agregado No.	Tamaño normal	Porcentaje que pasa cada uno de los siguientes tamices (mm)												
		100	90	75	63	50	37.5	25.0	19.0	12.5	9.5	4.75	2.36	1.18
1	90 - 37.5	100	90-100	--	25-60	--	0-15	--	0-5	--	--	--	--	--
2	63 - 37.5	--	--	100	90-100	35-70	0-15	--	0-5	--	--	--	--	--
3	50 - 25.0	--	--	--	100	90-100	35-70	--	0-15	--	--	--	--	--
357	50 - 4.75	-	--	--	100	95-100	--	35-70	--	10-30	--	0-5	--	--
4	37.5 - 19	--	--	--	--	100	90-100	20-55	0-15	--	0-5	--	--	--
467	37.5 - 4.75	--	--	--	--	100	95-100	--	35-70	--	10-30	0-5	--	--
5	25.0 - 12.5	--	--	--	--	--	100	90-100	20-55	0-10	0-5	--	--	--
56	25.0 - 9.5	--	--	--	--	--	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-15	--	--
57	25.0 - 4.75	--	--	--	--	--	100	95-100	--	25-60	--	0-10	0-5	--
6	19.0 - 9.5	--	--	--	--	--	--	100	90-100	20-55	0-15	0-15	--	--
67	19.0 - 4.75	--	--	--	--	--	--	100	90-100	--	20-55	0-10	0-5	--
7	12.5 - 4.75	--	--	--	--	--	--	--	100	90-100	40-70	0-15	0-5	--
8	9.5 - 2.36	--	--	--	--	--	--	--	--	100	85-100	10-30	0-10	0-5

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1826
QUITO

Tabla 5.15. Requisitos de granulometría de agregado fino para mortero según NTC 2240 y ASTM C144

Tamiz	Porcentaje que pasa	
	Arena natural	Arena procesada
4.75 mm	100	100
2.36 mm	95 - 100	95 - 100
1.18 mm	75 - 100	70 - 100
600 µm	40 - 75	40 - 75
300 µm	10 - 35	20 - 40
150 µm	2 - 15	10 - 25
75 µm	--	0 - 25

- **Forma de las partículas**

La forma del agregado depende mucho del tipo de roca que lo originó, ya que para ciertas piedras resulta determinante el sistema de clivaje, las posibles fracturas en la roca y su estado de meteorización. Las arenas, por su propio origen geológico, suelen ser de forma redondeada, pero cabe recordar que es posible obtenerlas mediante trituración, y en este caso la forma también va a depender de modo importante del sistema o maquinaria que se use para la fragmentación de la roca original en la producción de arena.

La clasificación más utilizada para definir la forma de las partículas del agregado, es descrita en la norma británica B.S.812, como se indica en la tabla 5.16.

Tabla 5.16. Clasificación de las partículas según su forma (13)

Clasificación	Descripción
Redondeada	Totalmente desgastada por el agua o completamente limitada por frotamiento
Irregular	Irregular natural o parcialmente limitada por frotamiento y con caras redondeadas.
Angular	Posee caras bien definidas, que se forman en la intersección de caras más o menos planas
Escamosa	Material en el cual el espesor es pequeño en (laminar) relación con los otras dos simensiones
Elongada	Material normalmente angular, en el cual la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones
Escamosa y elongada	Material cuya longitud es considerablemente mayor que el ancho y este es considerablemente mayor que el espesor

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1826
QUITO

La forma del agregado influye directa o indirectamente en el comportamiento del concreto, ya que se relaciona con la trabajabilidad, la resistencia y otras propiedades que se discutirán en los capítulos de concreto fresco y endurecido.

En todo caso, las formas perjudiciales son las muy alargadas y/o escamosas. Individualmente, este tipo de granos puede definir, si se trata del agregado grueso, un punto o una zona de debilidad dentro de la masa del concreto, en su comportamiento ante los esfuerzos mecánicos. Colectivamente, un ligero exceso de granos de estas formas puede afectar la trabajabilidad. Con el resto de formas normales se puede hacer buen concreto.

En los agregados para concreto, el contenido de las partículas planas o de las alargadas debe ser mínimo, puesto que esta clase, es perjudicial para el buen comportamiento del concreto. Las normas NTC 174 y ASTM C33 especifican que este contenido no debe ser superior al 50% de la masa total del agregado sobre la base de las siguientes definiciones:

Partícula larga: aquella cuya relación entre longitud y ancho es mayor de 1.5.

Larga (L/b) > 1.5

Donde :

L = Longitud de la partícula
b = Ancho de la partícula

Tabla 5.17. Clasificación de la textura superficial de los agregados - norma BS-812

Grupo	Textura superficial	Características
1	Vítrea	Fractura coloidal
2	Lisa	Desgastada por el agua, o losa debido a la fractura de la roca laminada o de grano fino
3	Granular	Fractura que muestra granos más o menos uniformemente redondeados
4	Áspera	Fractura áspera de roca con granos finos o medianos que contienen partículas cristalinas no fácilmente visibles.
5	Cristalina	Contiene partículas cristalinas fácilmente visibles
6	Apanalada	Con poros y cavidades visibles

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1826
QUITO

Partícula plana: aquella cuya relación entre el espesor y el ancho es menor de 0.5.

Plana $(d/b) < 0.5$

Donde :

d = Espesor de la partícula
b = Ancho de la partícula

- **Textura**

Reviste especial importancia por su influencia en la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento fraguado, así como también, por su efecto sobre las propiedades del concreto o mortero endurecido, tales como, densidad, resistencia a la compresión y a la flexión, cantidad requerida de agua, etc.

En términos generales, se puede decir que la textura superficial es áspera en las piedras obtenidas por trituración y lisa en los cantos rodados de río, quebrada o mar. La clasificación más utilizada está dada por la norma británica BS-812 que aparece en la tabla 5.17, la cual divide las superficies en términos de si es pulida, mate, suave o áspera, ligado a la dureza, tamaño, forma y estructura de la roca original.

Es deseable que las partículas tengan superficie áspera para que haya buena adherencia con la pasta de cemento, especialmente en los concretos de resistencia superior a los 28 MPa (285 kg/cm²), a 28 días de edad. Sin embargo, haciendo los ajustes necesarios en el diseño de la mezcla, con otros tipos de textura en los agregados también se puede hacer buen concreto.

Figura 5.7. Poros del agregado

- **Densidad**

Es una de las propiedades del agregado que depende directamente de la roca original de donde proviene y está definida como la relación entre la masa y el volumen de una masa determinada. Las normas NTC 176, NTC 237, ASTM C127 y ASTM C128 describen los procedimientos para determinar la densidad de los agregados gruesos y finos, respectivamente.

En el caso de los agregados que se utilizan para la elaboración de concreto, es nece-sario definir cuidadosamente el término densidad, puesto que generalmente entre sus partículas hay cavidades o poros que pueden estar vacíos, parcialmente saturados o llenos de agua dependiendo de la permeabilidad interna.

Los poros saturables son aquellos que están conectados con el exterior, mientras que los no saturables son los que están en el interior de las partículas y no están conectados con la superficie, tal como se esquematiza en la figura 5.8.

Densidad absoluta

Se denomina a la relación entre la masa la de las partículas y su volumen absoluto, el cual incluye exclusivamente el volumen de masa sólida, o sea, se excluyen todos los poros, saturables y no saturables.

$$\text{Densidad absoluta} = \frac{Ps}{Vm - Vp}$$

Donde:

Ps = Masa seca de la masa m
Vm = Volumen ocupado por la masa m
Vp = Volumen de los poros (saturables y no saturables)

Densidad nominal

Es la relación que existe entre la masa de las partículas y el volumen nominal, que es el que ocupan las partículas de ese material, incluyendo los poros no saturables.

$$\text{Densidad Nominal} = \frac{Ps}{Vm - Vps}$$

Donde:

Ps = Masa de m
Vm = Volumen ocupado por la masa m
Vps = Volumen de los poros saturables

Densidad aparente

Se denomina densidad aparente a la relación entre el masa de las partículas y su volumen aparente, que incluye el volumen de los poros saturables y no saturables que hay dentro de las partículas.

$$\text{Densidad aparente} = \frac{Ps}{Vm}$$

Donde:
Ps = Masa seca de m
Vm = Volumen ocupado por la masa m

Esta medida es una característica poco variable en el tiempo y en el espacio, y por lo general, en los agregados pétreos de masa normal, oscila entre 2.3 gr/cm^3 y 2.8 gr/cm^3 según la roca de origen.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM ALMA MATER SCIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

En el campo de tecnología del concreto, la densidad aparente es la más importante, debido a que con ella se determina la masa de agregado requerido para un volumen unitario de concreto, porque los poros interiores dentro de las partículas de agregados van a ocupar un volumen dentro de la masa de concreto y porque el agua que se aloja dentro de los poros saturables no hace parte del agua de mezcla; entendiéndose por agua de mezcla tanto el agua de hidratación del cemento como el agua libre que en combinación con el cemento, produce la pasta lubricante de los agregados.

- **Porosidad y absorción**

De las varias porosidades que se reconocen en un agregado, se suele medir la porosidad superficial o saturable mediante el ensayo indirecto de la absorción de agua, descrito en las normas ASTM C127, ASTM C128, NTC 176 y NTC 237. Cuanto más poroso es, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad. Pero el dato resulta de extraordinaria importancia en la etapa de ajustes de las condiciones reales de los materiales, ya que por su valor es posible hacer las correcciones necesarias en la cantidad de agua que se debe incorporar.

Desde el punto de vista de la porosidad y la capacidad de absorción de agua, el grano de agregado puede presentar una de las siguientes cuatro posibilidades:

- Absolutamente seco, con todos los poros vacíos, internos y superficiales.
- Seco al aire o exteriormente, con parte de la masa y de los poros internos llenos.
- Saturado y superficialmente seco, con toda la masa y los poros internos y de superficie llenos, pero con la superficie seca.
- Húmedo, cuando además de llenos todos sus poros, internos y superficiales, y de saturada toda su masa, se acumula humedad en la superficie.

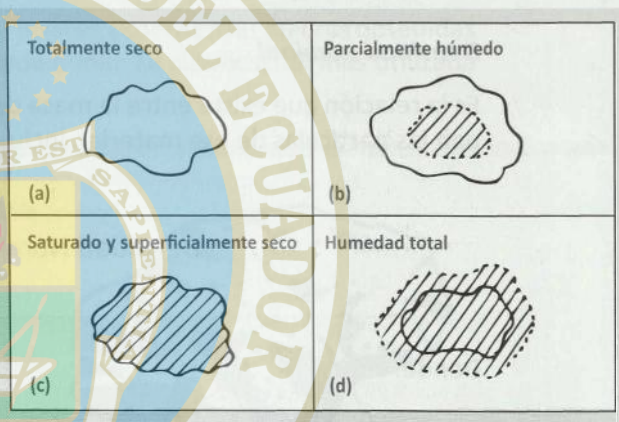


Figura 5.8. Estados de saturación del agregado

La figura 5.8 representa estos cuatro estados de saturación del agregado. De acuerdo al estado en que se encuentra uno u otro se hace la corrección y ajuste del diseño de mezcla. En el caso de que el material a emplear se encuentre en condiciones húmedas, hay que rebajar la cantidad de agua de amasado que incorpora a la mezcla y en los casos de estar absolutamente seco, o parcialmente seco, se debe incrementar la cantidad de agua de amasado, en la medida que sea necesaria, como se explicará en el capítulo de diseño de mezcla.

Según lo anterior, la capacidad de absorción de las partículas de agregado se puede determinar fácilmente por diferencia de pesos, entre el saturado y superficialmente seco, expresado como un porcentaje de la masa seca.

$$\% \text{ absorción} = \frac{(Psss - Ps)}{Ps} * 100$$

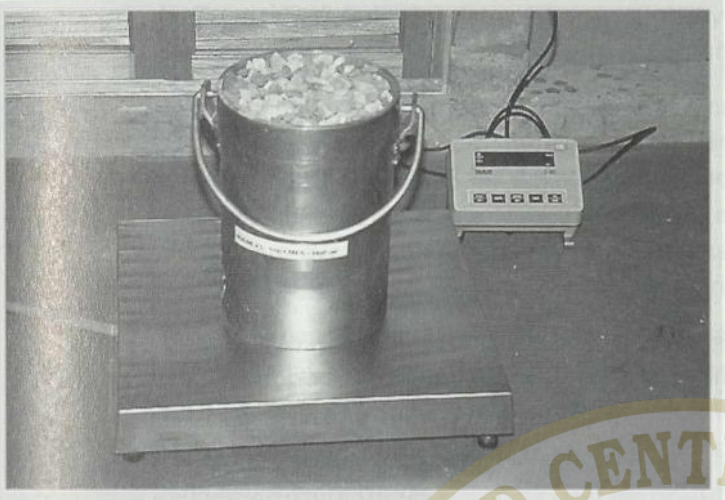


Figura 5.9 Ensayo de masa unitaria de agregados

Donde:

Psss = Masa de la muestra saturada y superficialmente seca
Ps = Masa seca de la muestra

- **Masa unitaria**

La conexión entre la masa del material que cabe en un determinado recipiente y el volumen de ese, da una cifra llamada masa unitaria. Si la colocación del agregado dentro del recipiente se ha hecho por simple efecto de la gravedad, desde una cierta altura de caída, se denomina masa unitaria suelta. Cuando la colocación se ha hecho en capas, posteriormente compactadas por golpes de una barra metálica, se le nombra masa unitaria compacta.

La masa unitaria compacta es otro buen índice para conocer la calidad del agregado, puesto que cuanto mejor sea la granulometría mayor es su valor numérico. En general, las partículas cuya forma se aproxima a la cúbica o a la esférica, producen mayor masa unitaria.

Por otra parte, es una característica física que se puede medir fácilmente siguiendo el procedimiento descrito en las normas NTC 92 y ASTM C29. Es suficiente con conseguir un recipiente cilíndrico, cuyas dimensiones de la sección sean del mismo orden de magnitud de su altura y que tenga entre 5 y 10 litros de capacidad. Ese recipiente se llena con tres capas de agregado y cada una de ellas se compacta para que el material quede bien acomodado. Finalmente se nivela con la parte superior del recipiente y se mide la masa dividiéndola por el volumen, logrado la masa unitaria apisonada.

Las masas unitarias sueltas pueden servir para relacionarlos con la densidad y dar una idea del volumen natural de vacíos que produce el agregado en su acomodo, y al mismo tiempo se relaciona con aspectos de la forma y textura.

Existe un fenómeno que puede afectar los volúmenes de material durante el transporte y almacenamiento de la arena, conocido como abultamiento o expansión, el cual consiste en un aumento de volumen para determinado masa de arena, causado por la presión del agua entre partícula y partícula, cuando se encuentra húmeda, o sea con agua libre en la superficie.

Experimentalmente se ha observado que al aumentar el agua libre de un 5 a un 8 por ciento, el abultamiento puede llegar a ser del 20 al 30 por ciento. Sin embargo, cuando la arena está totalmente inundada, el volumen disminuye y no existe expansión alguna. Por otra parte, la expansión en arenas gruesas puede ser hasta del 20 % y la de las muy finas hasta un 40%.

Propiedades mecánicas

- **Dureza**

Propiedad que depende de la constitución minerológica, la estructura y la procedencia del agregado. En la elaboración de concretos sometidos a elevadas tasas de desgaste por roce o

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR SIB - UCE

abrasión, como aplicaciones en pavimentos o revestimientos de canales, la dureza del agregado grueso es una propiedad decisiva para la selección de los materiales.

La dureza generalmente se determina indirectamente, por medio de un ensayo denominado desgaste en la máquina de los Ángeles, el cual se encuentra descrito en las normas NTC 93, NTC 98, ASTM C535 y ASTM C131. También se puede determinar mediante el ensayo descrito en las normas NTC 183 y ASTM C235. Pero, los datos que se obtienen, en algunos casos no son suficientes para decidir sobre si se pueden emplear o no, por lo cual el ensayo que más se emplea es el de desgaste en la máquina de los Ángeles.

El ensayo de Los Ángeles es una medida de la degradación de agregados minerales de gradaciones normalizadas resultante de una combinación de acciones, incluyendo abrasión o atrición, impacto, y pulimento en un tambor de acero giratorio que contiene un número específico de esferas de acero, dependiendo este número de la gradación de la muestra de ensayo. A medida que gira el tambor, una placa recoge la muestra y las esferas de acero, transportándolas alrededor hasta que caen al lado opuesto del tambor, creando un efecto de impacto - trituración. El contenido gira dentro del tambor con una acción de abrasión y pulimento hasta que la placa hace impacto y se repite el ciclo. Después del número prescrito de revoluciones, se remueven los contenidos del tambor y la porción de agregado se tamiza para medir la degradación como pérdida porcentual.

El ensayo en la máquina de los Ángeles ha sido usado ampliamente como un indicador de la calidad relativa de varias fuentes de agregados que tengan composiciones minerales similares. Los resultados no permiten hacer comparaciones válidas entre fuentes diferentes en origen, composición, o estructura. Los límites de especificaciones basados en este ensayo se deben asignar con extremo cuidado en consideración de los tipos de agregados disponibles y su historia de desempeño en usos para fines específicos.

- **Resistencia**

El agregado grueso, en mayor medida que el fino, va a resultar relacionado con el comportamiento de las resistencias del concreto, por su aporte en tamaños de grano dentro de la masa de la mezcla. En tal sentido, una de las posibilidades de ruptura de la masa es por medio del agregado grueso (las otras son por la pasta y por la interfase de contacto entre pasta y agregado). De esta manera, la resistencia de los agregados cobra importancia y se debe buscar que este nunca falle antes que la pasta de cemento endurezca.

La falla a través del agregado grueso se produce bien sea porque tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque previamente se le han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (especialmente cuando este se hace por voladura) o por un inadecuado proceso de trituración. Adicionalmente, cuando se aumenta la adherencia por la forma o textura superficial del agregado al buscar una alta resistencia en el concreto, también aumenta el riesgo de que las partículas del agregado fallen antes de la pasta de cemento endurecida.

Por tal motivo, se han desarrollado ensayos de resistencia a la trituración sobre muestras de roca y valores de trituración de los agregados a granel, los cuales dan una idea acerca del comportamiento de los agregados en el concreto. El primer ensayo tiene el inconveniente de que se está evaluando la calidad de la roca madre y no la calidad del agregado. El segundo que se llama ensayo del valor de trituración, está descrito en la norma BS-812.

- **Tenacidad**

La tenacidad o resistencia a la falla por impacto es una propiedad que depende de la roca de origen y se debe tener en cuenta yaque tiene mucho que ver con el manejo de los agregados, porque si estos son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría y también disminuir la calidad del concreto que con ellos se elabore. La manera de medirla se encuentra especificada en la norma BS-812.

- **Adherencia**

Se conoce con el nombre de adherencia la interacción que existe en la zona de contacto agregado-pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto.

La adherencia depende de la calidad de la pasta de cemento y, en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión. Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas.

Sustancias perjudiciales

- **Contenido de arcilla**

La presencia excesiva de tamaños muy pequeños en la grava y en la arena puede afectar el comportamiento deseado de la mezcla de concreto, perjudicando el fraguado y la adquisición de resistencia mecánica de este. En el caso de apariencia de finos en las gravas, es posible que estos pasen a engrosar parte de la granulometría de la arena, ya que sus granos quedan comprendidos en esos tamaños.

Desde luego, la presencia excesiva de finos puede plantear la mayor avidez de agua y con ella, crear una pasta fina que envuelva los granos de agregado y dañe sus condiciones de adherencia. Esta misma avidez de agua puede llegar a afectar las condiciones de trabajabilidad. Las normas NTC 174 y ASTM C33 indican los límites de finos tolerables tal como se aprecia en la tabla 5.18.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR POTENTIOR EST SAPIENTIA FUNDADA EN 1620 QUITO

Tabla 5.18. *Contenido máximo de partículas de diámetro inferior a 75 micras para diversos tipos de concreto según NTC 174 y ASTM C33*

Tipo de concreto	Porcentaje máximo de la masa total de la muestra			
	Agregado fino		Agregado grueso	
	Natural	Triturado	Natural	Triturado
Alta resistencia o sometido a desgaste	3 %	5 %	---	---
Normal	5 %	7 %	1 %	1.5%

La cantidad de arcilla se mide, de acuerdo con el procedimiento descrito en la norma NTC 78 o ASTM C117, por medio del tamizado sobre la malla de 75 micras (tamiz No.200). Una arena con el contenido superior al 3% exige mayor dosificación de cemento que la normal. Cuando se quiere obtener un concreto más de 28 MPa (4000 psi), es indispensable que la arena sea lo más limpia posible.

En caso de agregados obtenidos por trituración, suele ser abundante la presencia de polvillo, como material fino, por efecto mismo de las mandíbulas trituradoras, sin embargo, para su uso en el concreto deben tener su superficie limpia.

El lavado se usa para remover cantidades excesivas de partículas finas que son consideradas dañinas para la buena calidad del concreto y es uno de los pasos que usan los productores de agregados en la producción de los mismos. Después del procesamiento, los materiales finos pueden estar presentes como partículas sueltas, como recubrimientos en forma de polvo sobre agregados más grandes, o pueden aparecer como agregados grandes tales como bolas de arcilla o limo. Los materiales finos en los agregados pueden resultar de un lavado inadecuado o de la contaminación. Sin tener en cuenta su origen, los materiales finos evaluados por la norma NTC 78 y ASTM C33 son fácilmente dispersados con el agua y pueden ser lavados de los agregados más grandes, deseables. Se ha encontrado que ciertos agentes humectantes pueden ayudar a dispersar las partículas finas, por lo que este método de ensayo incluye alternativas para el uso del agua con un agente humectante o sólo agua.

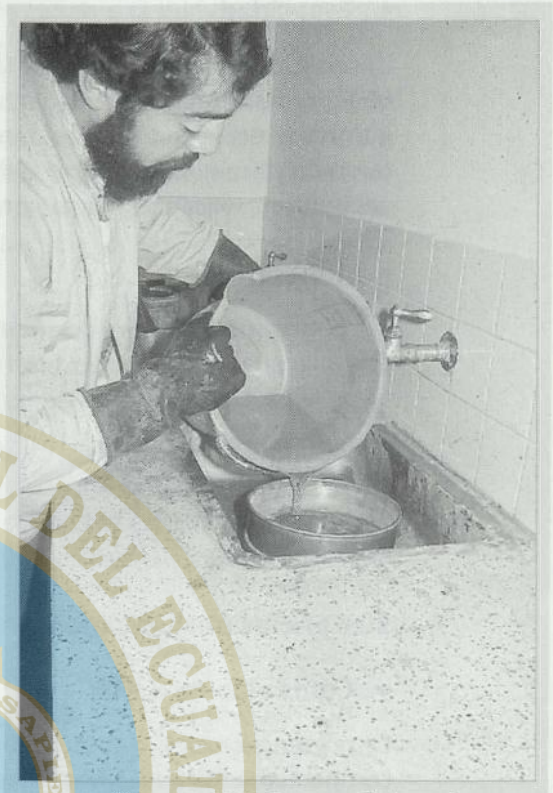


Figura 5.10 Ensayo de lavado sobre tamiz de 74 μ

Si hay exceso de partículas finas cubriendo los agregados, resultará una inadecuada adhesión entre la pasta de cemento endurecida y el agregado. Esto puede causar bajas resistencias a la compresión, durabilidad reducida, y, en algunos casos, estallidos, donde existen agregados recubiertos de polvo en cercanías a la superficie del concreto. Además, la presencia de material fino incrementa la demanda de agua en el concreto. La demanda de agua en aumento puede resultar en una durabilidad reducida, aumento de la contracción, y problemas con la trabajabilidad.

- **Terrones de arcilla o partículas deleznables**

El agregado grueso no debe contener terrones de arcilla u otros granos o grumos de material deleznable, tales como partículas blandas, madera, carbón, lignito o mica, los cuales se confunden con el agregado grueso por su forma. En la masa de concreto, los materiales deleznables significan puntos débiles que disminuyen las propiedades mecánicas del concreto o su durabilidad, en el caso de estar expuestos a la abrasión.

Las normas NTC 174 y ASTM C33 establecen los límites del contenido de partículas deleznables determinadas según las normas NTC 589 y ASTM C142. En la tabla 5.19 se presentan dichos límites.

Tabla 5.19 Límites para partículas inestables en el agregado según NORMA ASTM C33

Material	Porcentaje máximo de la masa total de la muestra	
	Agregado fino	Agregado grueso
Terrones de arcilla	1 %	0.25 %
Partículas blandas	---	5 %
Carbón y lignito (cuando es importante la apariencia superficial del concreto)	0.5 %	0.5 %
Carbón y Lignito (otros casos)	1 %	1 %

- **Sales solubles**

Algunos agregados pueden estar contaminados con un elevado contenido de sulfatos o de cloruros, adheridos a su superficie, por lo cual la arena resulta el agregado de mayor peligro, dada su elevada medida de superficie específica (cociente obtenido al dividir la superficie de un grano sobre su volumen). Estas circunstancias no pueden ser detectadas por la vista ni por el gusto, pues muy pequeñas cantidades ya son suficientes para significar un peligro para el concreto. (Basta el 1,0% de sulfatos, en peso, o el 0.1% de cloruros, en peso). Los sulfatos atacan al cemento produciendo reacciones expansivas que agrietan y desmoronan su masa.

Los cloruros corroen el acero del concreto reforzado, perdiendo sus condiciones resistentes, aumenta el volumen (pudiendo llegar hasta ocho veces su tamaño original), y agrieta las secciones de concreto. Si el ataque corrosivo de los cloruros se produce en un medio ambiente agresivo, las primeras grietas se abren camino al posterior ataque de las soluciones presentes en el ambiente, y el ciclo destructivo se hace de tipo acelerado.

Los agregados que pueden arrastrar este tipo de sustancias agresivas, suelen provenir de zonas cercanas a descargas de afluentes industriales, o de lugares relacionados con el mar, tanto del dragado del fondo marino, como de las playas, en zonas donde en alguna época llegó el mar y dejó restos de su salinidad.

- **Materia orgánica**

En algunos casos se puede encontrar presencia de altos contenidos de materia orgánica en los agregados. Las menos perjudiciales son las de tipo visible, tales como ramas o raíces, ya que pueden ser fácilmente detectadas y removidas. El peligro lo significa en mayor proporción la materia orgánica no visible que se impregna o adhiere a los granos de agregado. La presencia de elevadas cantidades de ese tipo de sustancias puede interferir con las reacciones químicas de la hidratación del cemento, así como también puede resultar en un concreto de menor resistencia y puede afectar la velocidad de reacción del cemento, ocasionando retrasos considerables en su tiempo normal de fraguado.

Los agregados expuestos al peligro de arrastrar este tipo nocivo de sustancias pueden provenir de áreas ganaderas, o de cierta clase de cultivos (caña de azúcar, especialmente), o bien donde se produzca concentración de ácido tánico o húmico, derivado de la abundancia de follaje.

Cuando debido al tamaño y al color de las partículas de arena no es posible detectar la presencia de materia orgánica a simple vista, se acostumbra emplear un ensayo muy fácil descrito en la ASTM C40 y NTC 127, en el cual se toma un frasco de unos 400 centímetros cúbicos de capacidad (un frasco de mermelada) y se llena hasta la mitad con arena y luego se agrega una solución al 3% de soda cáustica (NaOH). En 97 centímetros cúbicos de agua se disuelven 3 gramos de la arena. Se tapa el frasco y se agita bien. Luego se deja en reposo y al día siguiente se observa el color de la solución, si es incolora, amarilla o ámbar, no hay peligro con la materia orgánica. Si la coloración es ámbar intenso, o francamente oscura, lo más probable es que la arena contenga materia orgánica.

Control de la calidad de los agregados

La aplicación de los controles pone de manifiesto la calidad de los materiales, y en función de las necesidades de la obra y basándose en los criterios de aceptación o rechazo, se emplea o no el material. Los ensayos que normalmente se efectúan a los agregados se presentan en la tabla 5.20.

Figura 5.11. Ensayo colorimétrico

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Tabla 5.20. Lista de ensayos practicados sobre los agregados (5)

Tema	Norma NTC	Antecedente ASTM	Normas que deben consultarse
NORMAS GENERALES			
Agregados livianos para concreto estructural	4045	C330	92, 127, 589
Agregados para mortero de relleno	4020	C404	
Agregados usados en morteros de mampostería	2240	C144	
Práctica para la reducción del tamaño de las muestras de agregados tomadas en campo para la realización de ensayos	3674	C702	237, 129
Práctica para la norma de muestras de agregados	179	D75	3674
ESPECIFICACIONES			
Especificaciones de los agregados para concreto	174	C33	92, 127, 579, 126, 76
ENSAYOS SOBRE AGREGADOS			
Contenido de materia orgánica en arena	127	C40	579, 174, 3674, 129, 716
Determinación de la resistencia al desgaste de agregados gruesos hasta de 37.5 mm utilizando la máquina de las ángeles	98	C131	77, 93, 129, 32
	1784		32, 112, 121, 120
Determinación de la resistencia al desgaste de agregados gruesos mayores de 19 mm utilizando la máquina de los ángeles	93	C535	32, 77, 98, 129
Efectos de las impurezas orgánicas del agregado fino sobre la resistencia	579	C87	174, 127, 237
Método para detrminar al porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznables en el agregado	589	C142	174, 78
Método para determinar la cantidad de partículas livianas en los agregados pétreos	130	C123	32, 174, 176, 237
Método la densidad y la absorción de los agregados finos	237	C128	92, 126, 702
Método la densidad y la absorción de los agregados gruesos	176	C127	92, 237, 77
Método para determinar la dureza al rayado de los agregados gruesos	183	C235	

Continúa en la siguiente página

Tabla 5.20 continuación. *Lista de ensayos practicados sobre los agregados (5)*

Método para determinar la masa unitaria de los agregados	92	C29	129, 176, 237, 1000 1926
Método para determinar la sanidad de los agregados por ataque con sulfatos	126	C88	77, 174
Método para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 en agregados minerales	78	C117	77, 32, 129
Método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos	77	C136	32, 78, 129, 385
Método para la determinación del contenido total de humedad de los agregados por secado	1776	C566	176, 237, 129
Método químico para determinar la reactividad	175	C289	

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

ADITIVOS

Capítulo 6

Generalidades

Los aditivos son tan viejos como el concreto. Es sabido que durante el Imperio Romano se empezaron a adicionar sustancias, tales como, sangre y leche de animales, a los materiales cementantes, y así mejorar las propiedades y aumentar la durabilidad. Sin embargo, sólo hasta el siglo XX con la industrialización del cemento y del concreto, se ha iniciado el estudio sistemático de los aditivos para las múltiples aplicaciones que hoy en día tiene el concreto, en las cuales el comportamiento de una mezcla sin aditivos, en muchos casos no es el deseado.

Definición

Los aditivos son ingredientes del concreto o mortero que además del agua, agregados, cemento hidráulico y en algunos casos fibra de refuerzo, son adicionados a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado.

Uso de aditivos

Se utilizan con el objeto de modificar las propiedades del concreto o mortero, en estado fresco, durante el fraguado o en estado endurecido, para hacerlo más adecuado según el trabajo o exigencia dada y para que cumpla los requisitos y especificaciones particulares de cada tipo de estructura. Las características logradas mediante el uso de aditivos, que en muchos casos no se pueden lograr por otros métodos o en forma tan económica, son las siguientes:

- Reducción del costo de la construcción de concreto.
- Aumentar las especificaciones del concreto.
- Asegurar la calidad del concreto en condiciones ambientales severas durante las etapas de mezclado, transporte, colocación y curado.

La efectividad del aditivo depende del tipo, la marca y la cantidad de cemento, la cantidad de agua, la forma, granulometría y proporción de los agregados, el tiempo de mezclado, el asentamiento y las temperaturas del concreto y del aire.

Propiedades del concreto con aditivos

Generalmente el concreto con aditivos es más durable, resistente y la experiencia indica que se agrieta menos que un concreto que no lo incluya. Las propiedades que se pueden modificar en el concreto fresco, durante el fraguado y en estado endurecido se enumeran a continuación y serán estudiadas en los capítulos de concreto en estado fresco y estado endurecido.

En estado fresco:

- Aumento de la manejabilidad para el mismo contenido de agua o disminución del contenido de agua para la misma manejabilidad.
- Reducción de la segregación por mayor cohesividad de la mezcla.
- Aumento de la bombeabilidad, lo que implica menor presión de bombeo para un mismo flujo.
- Aumento del tiempo de manejabilidad.

Durante el fraguado:

- Retardo o aceleramiento del fraguado del concreto.
- Retardo o reducción en la generación de calor de hidratación.
- Reducción o prevención de las grietas por contracción.
- Control de la exudación o sangrado.

En estado endurecido:

- Aumento de resistencia en todas las edades.
- Aumento de resistencia a compresión, flexión y tracción.
- Aumento de la durabilidad o resistencia a condiciones severas de exposición.
- Disminución de la permeabilidad.
- Control de la expansión causada por la reacción Álcali-Agregado.

Clasificación de los aditivos

La norma NTC 1299 presenta la clasificación de los aditivos convencionales en cinco grupos de acuerdo con el efecto que producen, estos son los más frecuentemente utilizados, sin embargo, el desarrollo en los últimos años de nuevas tecnologías, hace necesaria una clasificación más amplia que incluya los aditivos especializados. En la tabla 6.1 se presenta dicha clasificación.

Aditivos convencionales

- **Plastificantes**

Los plastificantes o reductores de agua (aditivos Tipo A) son los más ampliamente usados. Se desarrollaron a partir del concepto de la ley de Abrams, según la cual la resistencia a la compresión del concreto es inversamente proporcional a la relación agua/cemento del mismo.

Agregar un plastificante a una mezcla sin disminuir el contenido de agua produce un aumento en la manejabilidad, no obstante la velocidad en la pérdida de manejabilidad no se reduce y en algunos casos se aumenta, lo que puede ocasionar problemas durante la colocación.

Los plastificantes dispersan las partículas de cemento, mediante la reducción de la atracción entre ellas evitando su aglutinación, con lo cual se logra una mejor fluidez de la pasta. El aumento

Tabla 6.1. Clasificación de los aditivos para concreto

Tipo de aditivo	Efecto deseado
Aditivos convencionales	
• Plastificantes	Plastificar o reducir agua entre 5% y el 12%
• Retardantes	Retardar el tiempo de fraguado
• Acelerantes	Acelerar el fraguado y el desarrollo de la resistencia a edades tempranas
• Plastificantes retardantes	Plastificar o reducir agua entre el 5% y el 12% y retardar el fraguado
• Plastificantes acelerantes	Plastificar o reducir agua entre el 5% y el 12% y acelerar el fraguado
• Superplastificantes	Superplastificar o reducir agua entre el 12% y el 30% y retardar el tiempo de fraguado
Inclusores de aire	**Aumentar la impermeabilidad y mejorar la trabajabilidad**
Aditivos minerales	
• Cementantes	Aumentar propiedades cementantes Sustituir parcialmente el cemento
• Pulzolanas	Mejorar la trabajabilidad, la plasticidad, la resistencia a los sulfatos Reducir la reacción álcali - agregado, la permeabilidad y el calor de hidratación. Sustituir parcialmente el cemento y rellenar.
• Inertes	Mejorar la trabajabilidad y rellenar
Aditivos misceláneos	
• Formadores de gas	Provocar expansión antes del fraguado
• Impermeabilizantes	Disminuir la permeabilidad
• Ayudas de bombeo	Mejorar la capacidad de bombeo
• Inhibidores de corrosión	Reducir el avance de la corrosión en ambientes con cloruros
• Colorantes	Colorear concreto

de fluidez permite reducir la cantidad de agua necesaria para una determinada manejabilidad. Las consecuencias del menor consumo de agua son: menor segregación de los agregados, mayor resistencia mecánica y menor porosidad lo que significa menor permeabilidad y mayor resistencia a la penetración de químicos. Dosis altas de plastificante pueden causar incrementos considerables en la contracción por secado.

Gracias a la utilización de este tipo de aditivos y a la investigación que se ha desarrollado sobre ellos, han pasado de ser productos simples a multicomponentes sofisticados, generalmente elaborados a partir de ligninas y ácidos carboxílicos.

Los primeros plastificantes modernos se elaboraron con ligninas, las cuales son productos obtenidos del procesamiento industrial de la madera y actualmente se ha refinado y mejorado su composición para lograr mayor rendimiento y confiabilidad. En climas cálidos únicamente requieren aumentar la dosificación para retardar el fraguado. Con este tipo de aditivos la exudación o sangrado es reducida con lo que en sitios de alta evaporización se pueden presentar fisuras superficiales.

Los ácidos carboxílicos son de aparición posterior a las ligninas y de comportamiento diferente, reducen la cohesividad característica de las ligninas pero aumentan la exudación. Esta mayor exudación puede ser benéfica para pavimentos o placas expuestas a alta temperatura y baja humedad, pero es desventajosa cuando se emplea en sistemas de placas y paredes de concreto a temperaturas normales o bajas, pues pueden quedar cavidades o juntas debido a la lámina de agua en la superficie la cual puede actuar como aislante si no se ejecuta un buen vibrado. Por otro lado el ácido carboxílico es un retardante fuerte que debe usarse con cuidado en temperaturas bajas.

Su efectividad depende de su composición química, de la temperatura del concreto, de la composición y finura del cemento, del contenido de cemento y de la presencia de otros aditivos.

- **Retardantes**

Los retardantes (aditivos tipo B) se utilizan principalmente para compensar el rápido fraguado ocasionado por las altas temperaturas (mayores a 32°C) y para poder mantener el concreto trabajable durante el proceso de colocación, así como para evitar la formación de juntas frías o discontinuidades en el concreto. El fraguado de concretos a altas temperaturas se acostumbra a retardar enfriando el agua de mezclado. Los aditivos retardantes no bajan la temperatura inicial del concreto.

El efecto del aditivo retardante en la velocidad de pérdida de asentamiento depende de las condiciones particulares de los materiales utilizados.

Otros usos de los retardantes son en concretos elaborados con cementos de rápido fraguado (tipo III) o en procesos de acabados especiales, con agregados a la vista o en grandes volúmenes de concreto, donde es indispensable controlar la generación de calor de hidratación para minimizar el riesgo de agrietamientos por tal motivo.

Los azúcares son las principales materias primas de estos aditivos, como se dijo en el capítulo de agua, su uso en pequeñas cantidades reduce la velocidad de fraguado, pero en dosis muy altas se puede llegar a inhibir la reacción.

El uso de retardantes generalmente va acompañado de una reducción de resistencia a edades tempranas (uno a tres días). Los efectos de estos materiales en las otras propiedades del

concreto, tales como contracción, pueden ser impredecibles. En consecuencia, es necesario ejecutar ensayos de recepción de los retardantes con los materiales con que se va a trabajar antes de emplearlos masivamente.

- **Acelerantes**

Los acelerantes (aditivos tipo C) son materiales que se adicionan al concreto con el propósito de reducir el tiempo de fraguado y acelerar el desarrollo de resistencias a edades tempranas. Hay acelerantes que reaccionan directamente con el cemento, como en el caso del cloruro de calcio, y otros que actúan catalizando la reacción, como la trietanolamina, la cual es más costosa y menos efectiva. Normalmente, los acelerantes se elaboran con cloruro de calcio, aunque su uso no es recomendado en concreto reforzado ni preesforzado, porque aún en pequeñas dosis pueden promover la corrosión. La dosis máxima aconsejable de cloruro de calcio es del 2% de la masa del cemento, pues una sobredosificación, aumenta la tasa de endurecimiento, incrementa la contracción durante el secado y disminuye las resistencias en edades tardías.

En términos generales se utiliza cuando se necesita desencofrar rápido, dar al servicio una estructura en corto tiempo, cuando debido al clima es necesario disminuir el tiempo normal de curado o cuando la temperatura es demasiado baja para estimular la reacción de hidratación del cemento y liberar calor.

El desarrollo de resistencias tempranas también se puede lograr mediante el empleo de cemento Pórtland Tipo III, reduciendo la relación agua/cemento con el aumento de 60 a 120 kg de cemento adicional por metro cúbico de concreto o aumentando la temperatura de curado.

En climas muy fríos puede no ser suficiente el uso de acelerantes y se debe recurrir a fuentes externas de calor como vapor, mezclado con agua caliente, etc. En climas cálidos se deben usar con cuidado, pues se puede generar calor de hidratación en cantidades muy elevadas lo que produce un muy rápido secado con los consecuentes agrietamientos.

No se recomienda el uso de cloruro de calcio ni de aditivos que contengan cloruros solubles, bajo las siguientes condiciones:

- En concreto preesforzado, debido a los posibles riesgos de corrosión.
- En los concretos que contengan aluminio embebido (por ejemplo tubo-conductos), puesto que puede producirse una corrosión severa del aluminio, especialmente cuando está en contacto con el acero de refuerzo en medios húmedos.
- En concretos sujetos a reacciones álcali-agregado o en medios agresivos con sulfatos.
- En losas de piso en que se trate de dar acabados metálicos.
- En climas cálidos.
- En concretos masivos.

En los casos en que no se recomienda el uso de cloruros, es posible emplear acelerantes no corrosivos sin cloruros, los cuales son menos efectivos y generalmente más costosos.

- **Plastificantes retardantes**

Los plastificantes retardantes (aditivos tipo D) combinan las propiedades de los plastificantes (tipo A), con los retardantes (tipo B), para lograr la reducción de agua para una manejabilidad, y controlar el tiempo de fraguado simultáneamente.

Algunos plastificantes normales sobredosificados pueden ser utilizados como plastificantes retardantes, aunque su uso debe ser supervisado y respaldado con ensayos previos que permitan prever el comportamiento para determinada mezcla.

- **Plastificantes acelerantes**

Los plastificantes acelerantes (aditivos tipo E) permiten la disminución del contenido de agua para una manejabilidad dada y aceleran tanto el fraguado como la adquisición de resistencia.

- **Superplastificantes**

Son los más modernos de la familia de los aditivos convencionales y con ellos se pueden obtener reducciones de agua entre el 12% y el 30%, esta reducción y la disminución agua/cemento permite obtener concretos con mayores adquisiciones de resistencia a edades tempranas. Usualmente son productos de melamina sulfatada o condensados de naftalina formaldehído.

Producen un concreto de alta fluidez sin reducir la resistencia a la compresión ni aumentar la exudación. La principal ventaja es la mayor consolidación del concreto, aún en elementos estructurales fuertemente armados con vibración mínima; por esta razón son ampliamente usados para fundir muros altos y angostos o columnas de gran altura. Al producirse una reducción de agua, mayor que la obtenida con reductores de agua convencionales, se logran resistencias más altas a todas las edades con trabajabilidad dentro de los límites normalmente especificados para compactar con vibración interna.

Algunos de estos aditivos pierden el alto asentamiento producido rápidamente, por lo cual se dosifican directamente en la obra o antes de que el concreto sea utilizado. De igual manera el costo de estos es superior al de los reductores de agua.

La norma ASTM C494 subdivide a los superplastificantes en tipo F de fraguado normal y tipo G de fraguado retardado. El tipo F se usa en climas fríos y con cemento tipo I, el tipo G se utiliza en climas cálidos y concretos masivos que requieran alta trabajabilidad.

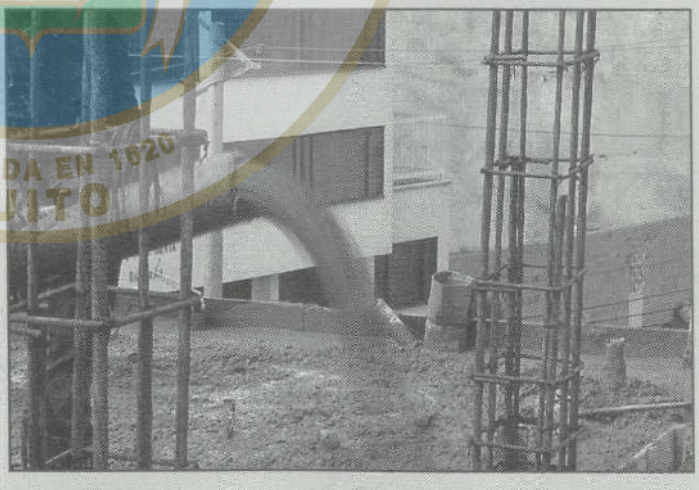


Figura 6.1. Concreto fluido

- **Aditivos inclusores de aire**

Este tipo de aditivos se utiliza para retener intencionalmente burbujas microscópicas de aire en el concreto, con lo cual se busca disminuir la permeabilidad, la segregación y el sangrado, así como

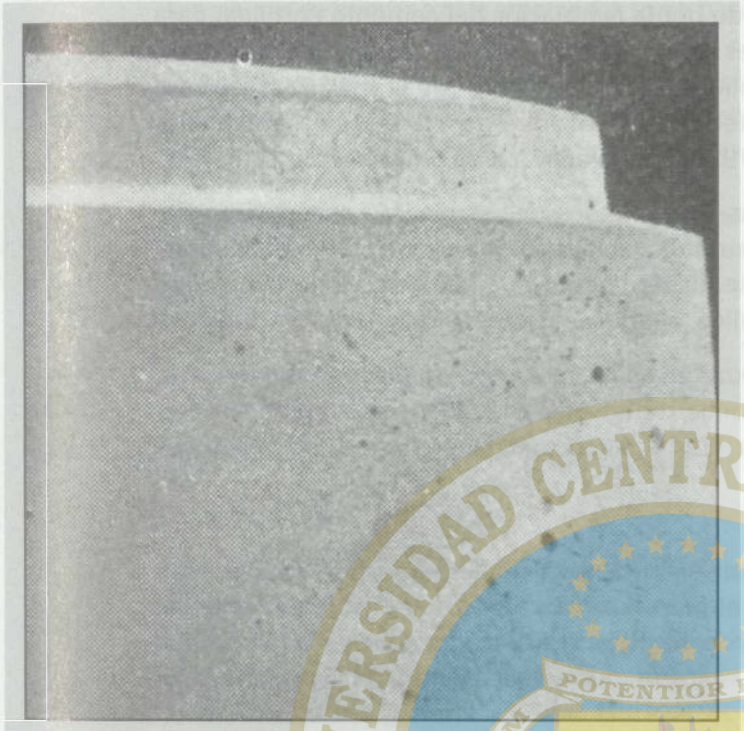


Figura 6.2. Concreto con aire incluido

también, aumentar la durabilidad frente a los ataques de agentes químicos, tales como los sulfatos y los ácidos. En los países templados son indispensables para proteger el concreto de los ciclos de congelamiento-descongelamiento. (Figura 6.2).

La incorporación o inclusión de aire en el concreto también se puede hacer usando cementos inclusores de aire. Los cuales son cementos Portland adicionados durante su fabricación con un agente inclusor de aire.

El contenido de aire debe estar entre el 3% y el 6% por volumen de concreto para proporcionar una satisfactoria protección en medios agresivos, la cantidad de aire incorporado depende, entre otros factores, de la proporción de materiales, del tamaño máximo del agregado grueso y del tipo de cemento.

- **Aditivos minerales**

Los países industrializados en los últimos años han desarrollado y perfeccionado estos aditivos, los cuales son materiales naturales o subproductos industriales pulverizados que mejoran o transforman algunas de las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido reduciendo costos. Estos aditivos se subdividen de acuerdo con sus propiedades físicas o químicas en materiales cementantes, puzolánicos y nominalmente inertes.

- **Materiales cementantes**

Son substancias que por sí solas tienen propiedades hidráulicas cementantes, tales como, la escoria granulada de alto horno molida, el cemento natural y la cal hidráulica hidratada.

La escoria de alto horno es un material granular metálico conformado por silicatos y aluminosilicatos de calcio que se desarrollan durante el proceso de fundición dentro de los altos hornos y se cristaliza por inmersión en agua. Este material es molido a menos de 45 micras hasta obtener una finura Blaine de 400 a 600 m^2/kg, de tal forma que al entrar en contacto con la pasta de cemento Pórtland, fragua y endurece.

El cemento natural se obtiene de la pulverización de las calizas arcillosas calcinadas hasta el punto de fusión. La cal hidráulica hidratada se consigue mediante la calcinación de calizas, que contengan sílice y alúmina.

- **Materiales puzolánicos**

Las puzolanas son aquellos materiales silíceos o aluminosilíceos que por sí mismos poseen poco o ningún valor cementante, pero que finamente molidas y en presencia de agua reaccionan

químicamente con el hidróxido de calcio, liberado por la hidratación del cemento Pórtland, para formar compuestos con propiedades cementantes. Generalmente se emplean materiales naturales, tales como, tierras diatomáceas, horstenos opalinos, arcillas, pizarras, tobas volcánicas y piedra pómez. La mayoría de las puzolanas naturales deben molerse antes de usarse y frecuentemente deben calcinarse a temperaturas entre 650 °C y 980 °C para activar sus componentes arcillosos.

Las cenizas volantes, son puzolanas obtenidas de los gases de las plantas generadoras de electricidad, que son alimentadas con carbón mineral pulverizado. La forma de las cenizas volantes es esférica y su tamaño varía entre menos de una micra a 100 micras, normalmente están compuestas por silicatos que contienen sílice, alúmina, hierro y calcio.

El humo de sílice o microsílica es un material puzolánico gris obtenido de los gases producidos durante la manufactura del silicio o de aleaciones de ferrosilíceo. Su forma, al igual que las cenizas volantes, es esférica, pero su tamaño es inferior a una micra.

- **Materiales nominalmente inertes**

Son los que tienen pocas o ninguna propiedad cementante, dentro de este grupo están el cuarzo finamente dividido, las dolomitas, las calizas y el mármol. Estos materiales frecuentemente se utilizan como adición del cemento durante el proceso de fabricación o como sustitución parcial de la arena para mejorar su granulometría y aumentar la mala trabajabilidad causada por la falta de finos.

Aditivos misceláneos

- **Formadores de gas**

Los aditivos formadores de gas tienen por objeto producir una pequeña expansión antes del endurecimiento de los concretos destinados a rellenar volúmenes confinados, tales como cimientos de máquinas o ductos de postensados en concreto preesforzado. Estos aditivos no controlan la contracción producida por secado o por carbonatación, generalmente están elaborados con polvo de aluminio y dependiendo de su dosificación se determina la magnitud de la expansión. Empleados en grandes cantidades sirven para producir concretos celulares o espumados, los cuales tienen grandes burbujas de aire incorporado.

- **Impermeabilizantes**

Los aditivos impermeabilizantes reducen la velocidad con que el agua a presión circula a través del concreto. Normalmente para tal fin, se emplean aditivos minerales, como el humo de sílice, los cuales reducen la permeabilidad por medio del proceso de hidratación y reacción puzolánica. Grados seguros de impermeabilidad pueden ser logrados, sin necesidad de emplear impermeabilizantes, cuando se disminuye el contenido de agua o se aumenta el contenido de cemento y el período de curado húmedo. Algunos aditivos tales como los inclusores de aire o plastificantes y superplastificantes aumentan la impermeabilidad del concreto.

- **Ayudas de bombeo**

Las ayudas de bombeo se adicionan a las mezclas de concreto para mejorar las características de bombeabilidad, de tal forma, que sea posible bombear un concreto que bajo otras condiciones no lo sería. Estos aditivos aumentan la viscosidad para reducir la deshidratación de la pasta mientras se encuentra bajo la presión de la bomba.

Las ayudas de bombeo más empleadas son a base de polímeros orgánicos y sintéticos, floculantes orgánicos, emulsiones, bentonitas, puzolanas, cenizas volantes y cal hidratada. Algunas de ellas pueden aumentar la demanda de agua, reducir las resistencias mecánicas, provocar inclusión de aire o retardar los tiempos de fraguado. Sin embargo, estos efectos pueden corregirse ajustando el diseño de la mezcla o adicionando otros aditivos.

Los plastificantes, superplastificantes, minerales finamente divididos e inclusores de aire, que se utilizan para distintos propósitos principales, también mejoran la bombeabilidad.

- **Inhibidores de corrosión**

Son productos que detienen químicamente la corrosión del acero embebido dentro del concreto, los cuales generalmente están elaborados con base en nitrito de calcio. Pueden emplearse en combinación con otros métodos, tales como la protección catódica, para prevenir la corrosión.

- **Colorantes**

Los aditivos colorantes se emplean en la elaboración de concretos coloreados, los cuales se elaboran con fines arquitectónicos o de seguridad, como es el caso del concreto rojo que se utiliza en el recubrimiento de algunas líneas eléctricas o de gas para advertir sobre su presencia. Estos aditivos generalmente se elaboran a partir de óxidos minerales y se presentan en polvo o líquidos, por lo general las casas fabricantes recomiendan dosis inferiores al 6% en masa de cemento, para asegurar que no se afectan las propiedades del concreto.

- **Aditivos para mortero de larga vida**

Con el objeto de prolongar la manejabilidad del mortero por varias horas o días, sin necesidad de adición de agua o cemento, se acostumbra a emplear aditivos para mortero de larga vida. En el momento en que este mortero entra en contacto con una superficie absorbente, comienza su proceso de fraguado normal, obteniendo excelentes resistencias y disminuyendo la retracción de la pega en mampostería.

Con el uso de estos aditivos se garantiza la uniformidad de sus propiedades en el tiempo, ya que pueden ser suministrados desde una planta premezcladora que lo certifique como mortero de larga vida y por otro lado se acelera el proceso de ejecución de las obras y se reducen los costos, por cuanto se aumenta el rendimiento del personal y se disminuye el desperdicio.

El efecto de los aditivos convencionales, minerales y misceláneos se debe evaluar utilizando los materiales particulares de la obra o planta y bajo las mismas condiciones climáticas de la zona de trabajo, pues en ocasiones se pueden presentar resultados adversos.

Control de calidad de los aditivos

Los aditivos al igual que el resto de ingredientes del mortero o concreto deben ser sometidos a control de calidad para verificar su homogeneidad y uniformidad en los diferentes lotes y el cumplimiento de las características especificadas por el fabricante.

Los ensayos empleados son: observación de la naturaleza física, determinación del contenido de sólidos, determinación del pH, determinación de la densidad y análisis de ingredientes tales como cloruros o carbohidratos y examen espectroscópico infrarrojo o ultravioleta para

identificación de los componentes activos. En la norma NTC 1299 y ASTM C 494 se encuentran descritos algunos de estos ensayos.

Para evaluar los efectos de los aditivos sobre una mezcla particular, se acostumbra a comparar bajo las mismas condiciones ambientales el comportamiento de dicha mezcla denominada testigo o control y la misma adicionada con diferentes dosis recomendadas por el fabricante. Los ensayos sobre concreto que frecuentemente se especifican para evaluar la acción de los aditivos son reducción de agua, contenido de aire, pérdida de manejabilidad, tiempo de fraguado y resistencia mecánica.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST
OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

PROPIEDADES DEL CONCRETO FRESCO

Capítulo 7

Generalidades

El concreto se puede encontrar en estado fresco, en proceso de fraguado o en estado endurecido, y en estos tres estados presenta características típicas, las cuales determinan su desempeño.

La propiedad a la que con mayor frecuencia se hace referencia es la resistencia a la compresión, debido a que es muy fácil de evaluar y en la mayoría de los casos es suficiente para garantizar un buen comportamiento estructural. Sin embargo, no hay que olvidar que existen otras propiedades que deben ser controladas para mejorar la eficiencia de los procesos constructivos y aumentar su vida útil.

El concreto se elabora con diversos grados de manejabilidad, velocidad de fraguado, durabilidad, masa unitaria, estabilidad de volumen, apariencia y las propiedades adecuadas en estado endurecido como la resistencia.

La clasificación en diferentes tipos, usualmente se hace considerando la variación en las propiedades y características del concreto en los diferentes estados, razón por la cual es importante conocer cada una de ellas, así como también las medidas de control que se deben efectuar para garantizar su calidad.

Concreto en estado fresco

Las propiedades en estado fresco del concreto deben permitir que se llenen adecuadamente las formaletas y los espacios alrededor del acero de refuerzo o armadura, así como también obtener una masa homogénea sin grandes burbujas de aire o agua atrapada.

Es claro que las propiedades del concreto en el sitio no pueden ser obtenidas directamente en su estado fresco, puesto que las características de los elementos estructurales se ven afectadas por las prácticas en obra. Sin embargo, el control de calidad en este momento es la única herramienta para tomar decisiones rápidas durante su colocación.

Las propiedades del concreto en estado fresco, que pueden ser determinadas mediante métodos de ensayo, son:

- Trabajabilidad o manejabilidad
- Segregación
- Exudación o sangrado
- Masa unitaria
- Contenido de aire
- Contenido de agua

A continuación se explican cada una de estas propiedades:

Trabajabilidad o manejabilidad

Es aquella que determina cual es el trabajo utilizado en vencer la fricción entre los componentes del concreto, y entre este y el encofrado o refuerzo, para lograr una compactación adecuada. En otras palabras, es la capacidad que él tiene para ser colocado y compactado apropiadamente sin que se produzca segregación alguna.

La trabajabilidad está representada por el grado de compacidad, cohesividad, plasticidad y la consistencia o movilidad.

La compacidad: es la facilidad con la que el concreto o mortero fresco es compactado o consolidado para reducir el volumen de vacíos y por lo tanto el aire atrapado.

La cohesividad: es la aptitud que tiene el concreto o mortero fresco para mantenerse como una masa estable y sin segregación.

La plasticidad: es la condición del concreto o mortero fresco que le permite deformarse continuamente sin romperse.

La consistencia o movilidad: es la habilidad del mortero y concreto fresco para fluir, es decir la capacidad de adquirir la forma de los encofrados que lo contienen, y de llenar espacios vacíos alrededor de los elementos que absorbe.

La trabajabilidad se selecciona según el tamaño y características de la sección a construir, las condiciones de colocación de la mezcla y el sistema de compactación utilizado.

- **Factores que afectan la manejabilidad**

Está influenciada principalmente por el contenido de agua de mezclado, contenido de aire, propiedades de los agregados, relación pasta/agregados y las condiciones climáticas.

Contenido de agua de mezclado

El agua de mezclado hace parte aproximadamente del 15% del volumen total del concreto, del cual únicamente el 5% es para hidratarlo y el 10% restante es el agua evaporable. Esta última es el principal factor que afecta la manejabilidad, ya que en la medida que se incrementa su contenido aumenta la fluidez y permite una mayor lubricación de los agregados.

Contenido de aire

El contenido de aire naturalmente atrapado e incorporado intencionalmente, produce disminución en los requerimientos de agua del concreto para una misma manejabilidad, al igual que un aumento de las condiciones de cohesión.

Propiedades de los agregados

Las propiedades físicas de los agregados que afectan las características del concreto en estado fresco son: el tamaño máximo, forma y textura de las partículas, densidad, absorción, contenido de finos y materia orgánica.

La cantidad de material de tamaño mayor al tamiz 50 µm (No. 50), la angularidad y gradación de los agregados y proporciones de los componentes del concreto son los factores que más influyen en la facilidad de terminado. Los posibles remedios para mejorar los acabados incluyen el uso adicional de finos en la arena, más cemento, más puzolanas, y el uso de aditivos convencionales e inclusores de aire.

La gradación y forma de las partículas de los agregados influyen en buena proporción para obtener concreto fresco trabajable, y al mismo tiempo en la obtención de concreto endurecido económico de buenas propiedades.

La cantidad de agua necesaria para unas condiciones específicas de trabajabilidad, depende del tamaño máximo del agregado grueso y de la forma, textura y distribución granulométrica de las partículas del agregado fino.

Un aumento en la rugosidad y angularidad del agregado grueso puede elevar los requerimientos de agua de mezcla y, por lo tanto, el contenido de cemento para un nivel dado de trabajabilidad, pero este efecto generalmente no es más grande que el que tiene la forma y textura del agregado fino.

Además el agregado grueso con alto contenido de partículas alargadas o planas puede producir concretos «ásperos» para algunos métodos de colocación resultando en vacíos, hormigueros, coqueras o bloqueo de bombas.

Cualquier cambio en la gradación o angularidad de las partículas puede aumentar los vacíos interpartículas del agregado grueso que requerirán un aumento del mortero dentro del concreto.

Relación pasta/agregado

La cantidad de pasta está relacionada con el área superficial de los agregados, ya que su función en estado fresco es actuar como lubricante y producir concretos trabajables.

En términos generales a mayor relación pasta/agregado se incrementa la cohesividad del concreto, sin embargo no debe ser tan alta porque se puede presentar segregación.

Condiciones climáticas

El viento, el sol, la temperatura y la humedad ambiente, afectan la manejabilidad del concreto debido a que pueden producir: (1) pérdidas de agua por evaporación, (2) cambios en temperatura interna del concreto por intercambio de calor, (3) cambios volumétricos y (4) modificación en los tiempos de fraguado.

- **Efecto del tiempo y la temperatura sobre la trabajabilidad**

El concreto recién mezclado se vuelve rígido con el tiempo, fenómeno que no debe ser confundido con el falso fraguado del cemento. En este momento lo que ocurre es que el agua de mezclado es eliminada por las reacciones químicas iníciales, es absorbida por los agregados y en parte se evapora, especialmente si el concreto está expuesto al sol y al viento.

La magnitud de la pérdida de trabajabilidad depende de la riqueza de la mezcla, el tipo de cemento, la temperatura del concreto y la manejabilidad inicial. La variación de la trabajabilidad en relación al tiempo también es afectada por las condiciones de humedad del agregado, debido a que se presenta absorción del agua de mezcla en los poros de este, cuando se mezcla seco o con menor contenido de humedad a la absorción.

Por esta razón, antes de mezclar se debe hacer la corrección por humedad, que consiste en considerar el agua que está por exceso o defecto de la condición saturada y superficialmente seca, de tal forma que se adicione la cantidad exacta del diseño de mezcla. Cuando el concreto se hace bajo condiciones controladas de laboratorio es preferible trabajar con el agregado en estado saturado y superficialmente seco (sss), rociándolo con agua un día antes y protegiéndolo de la deshidratación.

Más importante que la temperatura ambiente es la del concreto, ya que esta es la que controla las reacciones químicas que se producen en la mezcla y por tanto modifica las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido.

La norma ASTM C1064 (NTC 3357) fija los límites de la temperatura del concreto fresco. La medición de la temperatura se hace cuando el concreto es recibido en la obra, con termómetros de vidrio o con corazas, los cuales deben tener una precisión de 1 °C y deben ser introducidos dentro de la muestra representativa por mínimo dos minutos o hasta que la lectura se estabilice. También es posible determinar la temperatura mediante medidores electrónicos de temperatura con pantallas digitales de precisión.

- **Ensayos para determinar la trabajabilidad**

Las propiedades tales como cohesión y adhesión son las que determinan el grado de manejabilidad y usualmente son juzgadas por examen visual y manipulación del concreto con herramientas para dar acabados, debido a que hasta el momento no se conoce ningún ensayo que las mida directamente.

Sin embargo, se han desarrollado una serie de ensayos con los cuales se puede determinar o correlacionar las propiedades del concreto en estado plástico en términos de consistencia, fluidez, cohesión y grado de compactación.

Ensayo de asentamiento

Es una medida de la consistencia del concreto, que se refiere al grado de fluidez de la mezcla, esto indica qué tan seca o fluida está cuando se encuentra en estado plástico y no constituye por sí misma una medida directa de la trabajabilidad.

Otras propiedades tales como cohesividad, facilidad de colocación y terminación son también importantes, pero no son medidas por este ensayo, de esta manera la medida de asentamiento sólo es un índice representativo del conjunto de dichas propiedades, que no las pondera según la influencia de cada una sobre el concreto, lo cual da lugar a que algunas características no queden bien representadas.

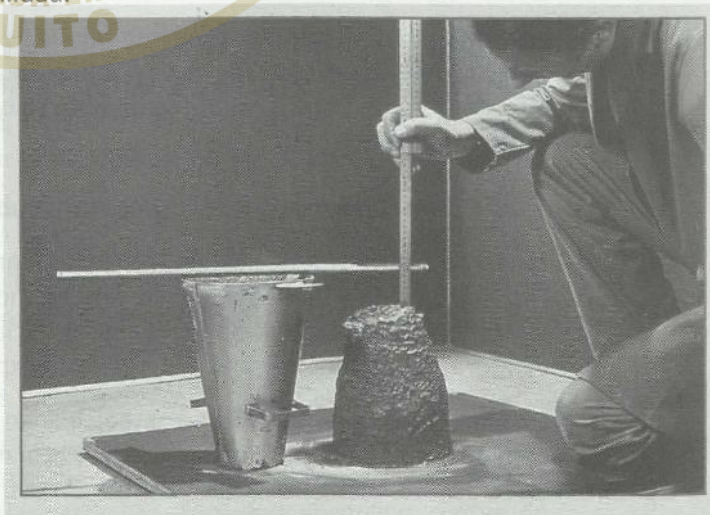


Figura 7.1. Ensayo de asentamiento

La geometría del Cono de Abrams se presenta en la figura 7.2 y el método de ensayo que esta descrito en las normas NTC 396 y ASTM C143, en términos generales consiste en lo siguiente:

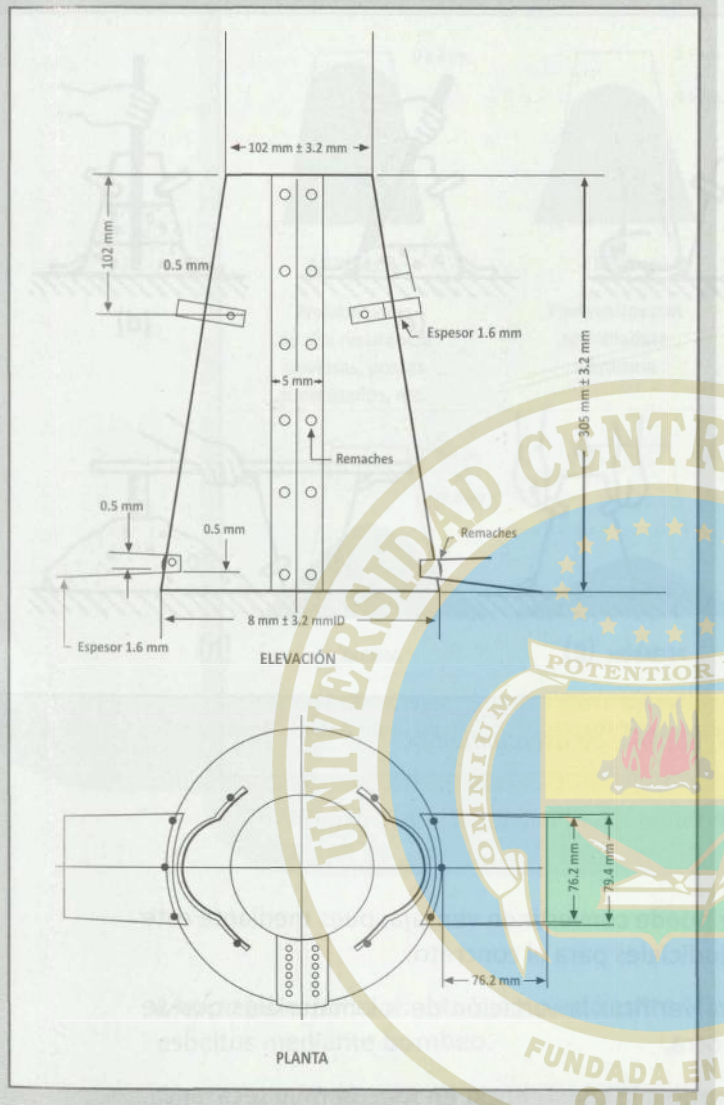


Figura 7.2. Características del cono de Abrams

Se coloca el molde sobre una superficie horizontal, plana y no absorbente, presionando con los pies las agarraderas para que el concreto no se salga por la parte inferior del molde. (Ver figura 7.3-b).

En seguida, se llena el cono en tres capas cada una de aproximadamente igual volumen, apisonándose cada capa con 25 golpes dados con el extremo redondeado de una varilla de 16 mm de diámetro y 60 cm de longitud.

La introducción de la varilla se debe hacer en diferentes sitios de la superficie y hasta una profundidad tal, que penetre ligeramente en la capa inferior con el objeto de que la compactación se distribuya uniformemente sobre la sección transversal (Ver figura 7.3-c-d-e).

Al final de la tercera capa, se nivela la superficie, bien sea con la varilla o con un palustre (Ver figura 7.3-f). Se retira la mezcla que haya caído al suelo en la zona adyacente a la base del molde, el cono se levanta 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 (Ver figura 7.3-g).

Una vez retirado el molde, la muestra sufre un asentamiento (por esto recibe el nombre del ensayo), el cual se mide inmediatamente como diferencia entre la altura del molde y la altura medida sobre el centro de la base superior del espécimen (Ver figura 7.3-h)

El ensayo de asentamiento está ampliamente difundido en nuestro medio debido a la facilidad y rapidez con que se realiza, sin embargo, no se puede aplicar en algunos casos, tales como concretos muy secos con asentamiento inferior a 25 mm y concretos elaborados con fibras o con agregados livianos. La consistencia en el concreto con fibras se expresa en términos del tiempo que tarda en fluir este a través de cono invertido (ver norma NTC 3689), para los concretos elaborados con agregados livianos se emplea a veces un cono modificado, de mayor altura para compensar la diferencia que tienen en masa.

El cono formado por concretos normales es simétrico, con paredes más o menos abombadas según el asentamiento y con la superficie superior horizontal. Los concretos ásperos o pedregosos forman un cono con la base superior inclinada, o totalmente caída hacia un lado, o que se va desmoronando según el contenido de agua. En tales casos, se debe repetir el ensayo sobre una muestra diferente y si se obtiene el mismo resultado el ensayo no es aplicable.

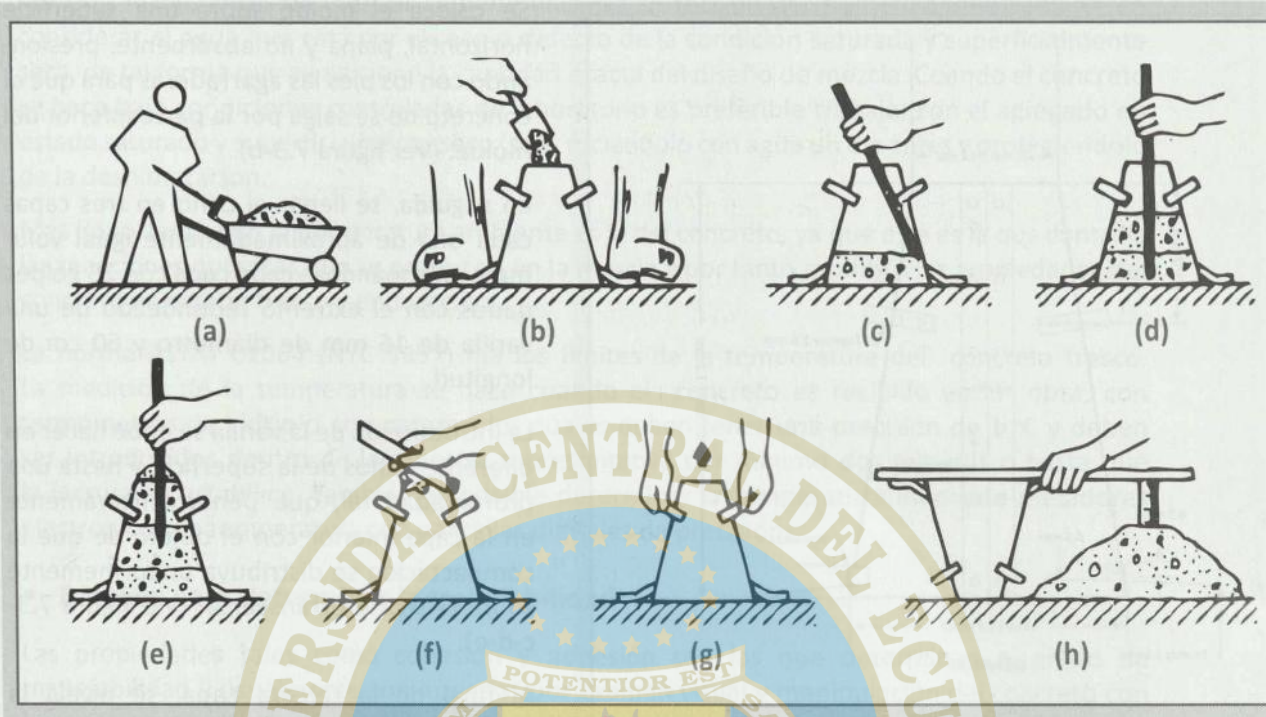


Figura 7.3. Ensayo de asentamiento

Esta es una limitación que con cierta práctica se puede convertir en ventaja, pues mediante este ensayo se pueden detectar granulometrías perjudiciales para el concreto.

El ensayo de asentamiento es muy valioso para verificar la variación de los materiales que se introducen en la mezcladora de una bachada a otra.

El concreto en estado fresco se clasifica de acuerdo a la consistencia en mezcla muy seca, seca, semiseca, media, húmeda y muy húmeda, tal como se aprecia en la figura 7.4.

Mezcla muy seca: el asentamiento es inferior a 2 cm y frecuentemente es empleada en la elaboración de prefabricados de alta resistencia, como traviesas y postes pretensados. Debido a la poca manejabilidad que tiene es necesario colocarla con vibradores de formaleta y compactarla mediante vibración extrema, en algunos casos puede requerirse presión. También es posible lanzar estas mezclas por vía húmeda en revestimientos de pantallas de cimentación o fundación.

Mezcla seca: el asentamiento está entre 2,5 y 3,5 cm, se utiliza en la construcción de pavimentos colocados con terminadora vibratoria.

Mezcla semiseca: el asentamiento está entre 3,5 y 5 cm, las aplicaciones más comunes son en pavimentos y cimentaciones en concreto simple colocados mediante máquinas de operación manual y compactadas por vibración.

Mezcla media: el asentamiento está entre 5 y 10 cm por lo cual se pueden emplear en pavimentos, losas, muros y vigas.

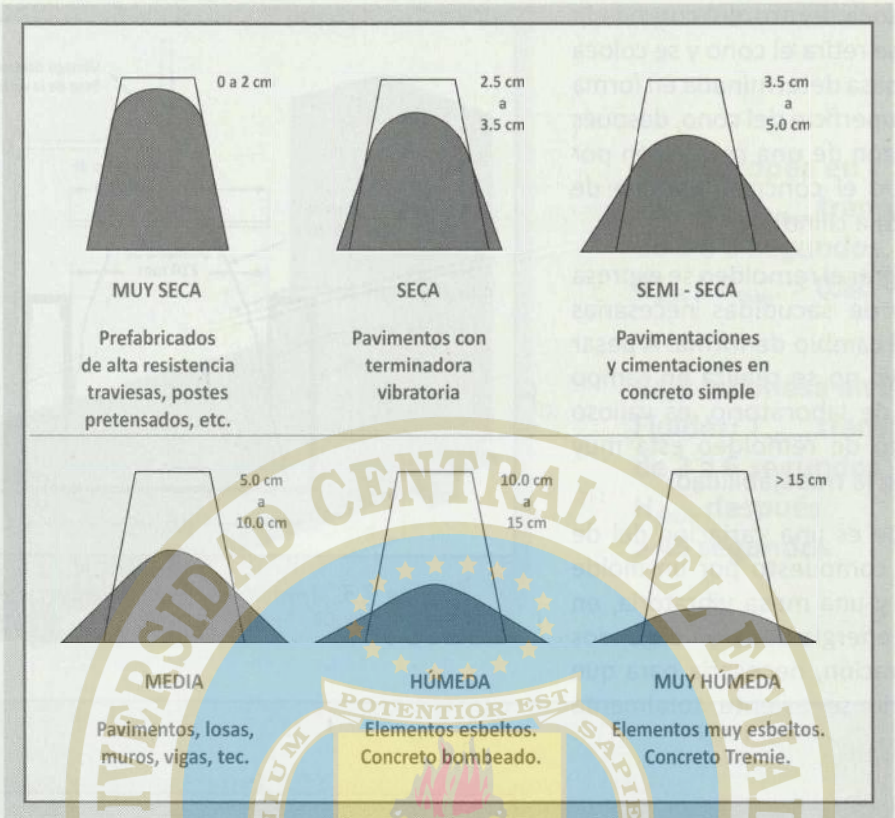


Figura 7.4. Clasificación del concreto según su consistencia

Mezcla húmeda: el asentamiento está entre 10 y 15 cm, se utiliza en la elaboración de elementos esbeltos mediante bombeo.

Mezcla muy húmeda: el asentamiento es mayor a 15 cm, se emplea en la construcción de elementos muy esbeltos y pilotes fundidos «in situ» mediante el sistema de tubo Tremie.

Ensayo de remoldeo

Para mezclas muy secas se puede emplear el ensayo de origen alemán de la mesa de flujo, que es una variación del ensayo de fluidez del mortero y está descrito en la norma DIN 1048 y ASTM C124. Este ensayo dejó de utilizarse porque mide la trabajabilidad en función únicamente de la cohesividad.

Existen otros métodos basados en el mismo principio, que también consisten en producir vibración sobre una masa de concreto mediante un soporte que se encuentra sobre el material, pero que ponderan la compacidad, plasticidad y consistencia.

El ensayo de remoldeo creado por Powers mide la trabajabilidad con base en el esfuerzo que se hace para cambiar la forma de una muestra de concreto, la figura 7.5 muestra el diagrama del aparato adecuado, el cual consiste en un cono normal de asentamiento colocado dentro de una olla cilíndrica, con doble pared en la parte superior, sujetada a una mesa vibratoria.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
SIB - UCE

El concreto se coloca dentro del cono de la manera habitual, se retira el cono y se coloca un pistón de una masa determinada en forma de disco sobre la superficie del cono, después la mesa vibra a razón de una revolución por segundo hasta que el concreto cambia de forma troncocónica a cilíndrica.

El esfuerzo para lograr el remoldeo se expresa como el número de sacudidas necesarias para que ocurra el cambio de forma. A pesar de que este ensayo no se realiza en campo sino solo a nivel de laboratorio, es valioso porque el esfuerzo de remoldeo está muy correlacionado con la trabajabilidad.

El aparato de Vebe es una variación del de Powers, que está compuesto por un molde sin pared interna y una mesa vibratoria, en donde se mide la energía dada en segundos de tiempo de vibración, necesaria para que un disco de vidrio se asiente totalmente sobre la mezcla.

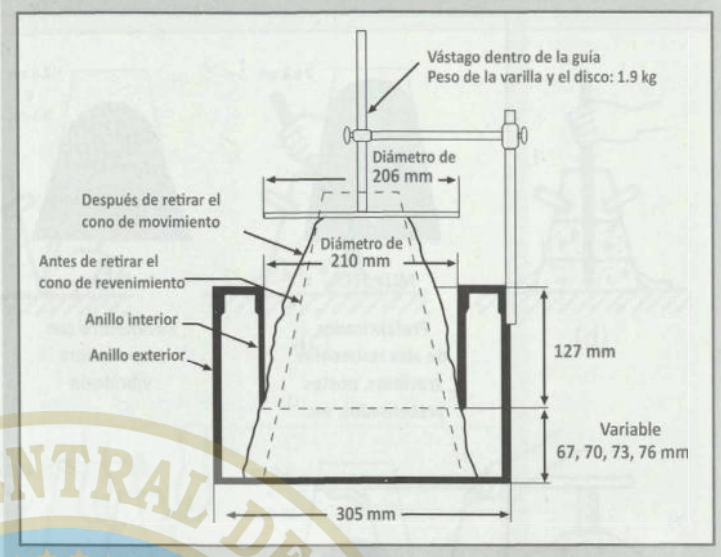


Figura 7.5. Aparato de remoldeo creado por Powers

Control de fluidez

Para mezclas de alta fluidez, como en los concretos autocompactantes se establece la fluidez mediante el ensayo de caja en forma de L. Este ensayo mide la diferencia de niveles entre la altura inicial y la final después de que el concreto recorre una distancia de 40 cm en un tiempo determinado. El ensayo tiene dos versiones. (Ver figura 7.7.)

De esta manera se puede apreciar que tan fluido es el concreto, sin perder propiedades tan importantes como que el recorrido del flujo sea constante, lo que garantiza que llena todos los espacios y también que no existe segregación durante el recorrido para así obtener una masa homogénea.

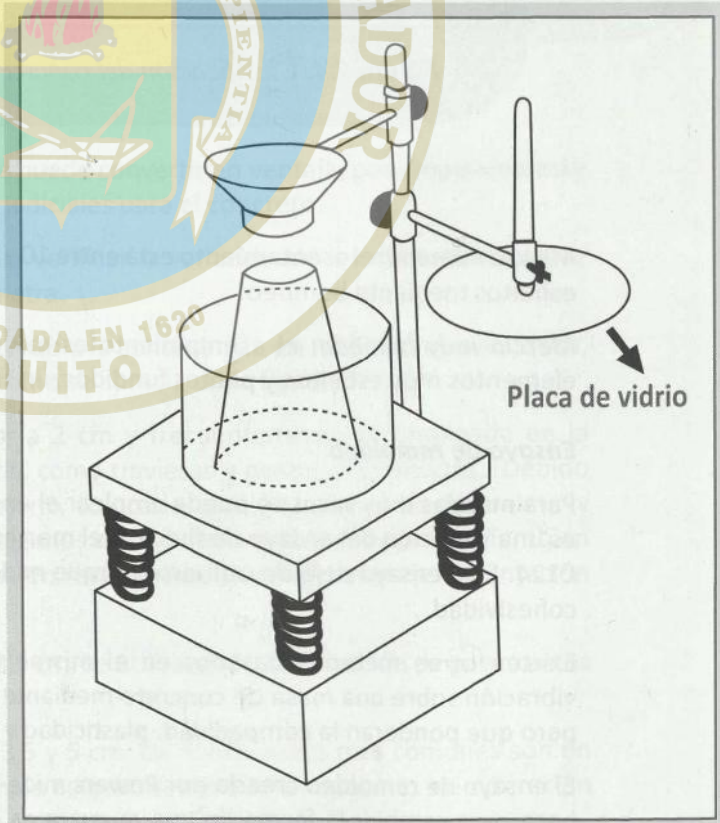


Figura 7.6. Aparato de Vebe

- **Otros ensayos**

La manejabilidad también se mide indirectamente mediante otros procedimientos, tales como el ensayo con la bola de Kelly y el factor de compactación.

El ensayo con la bola de Kelly, que está descrito en la norma ASTM C360, se basa

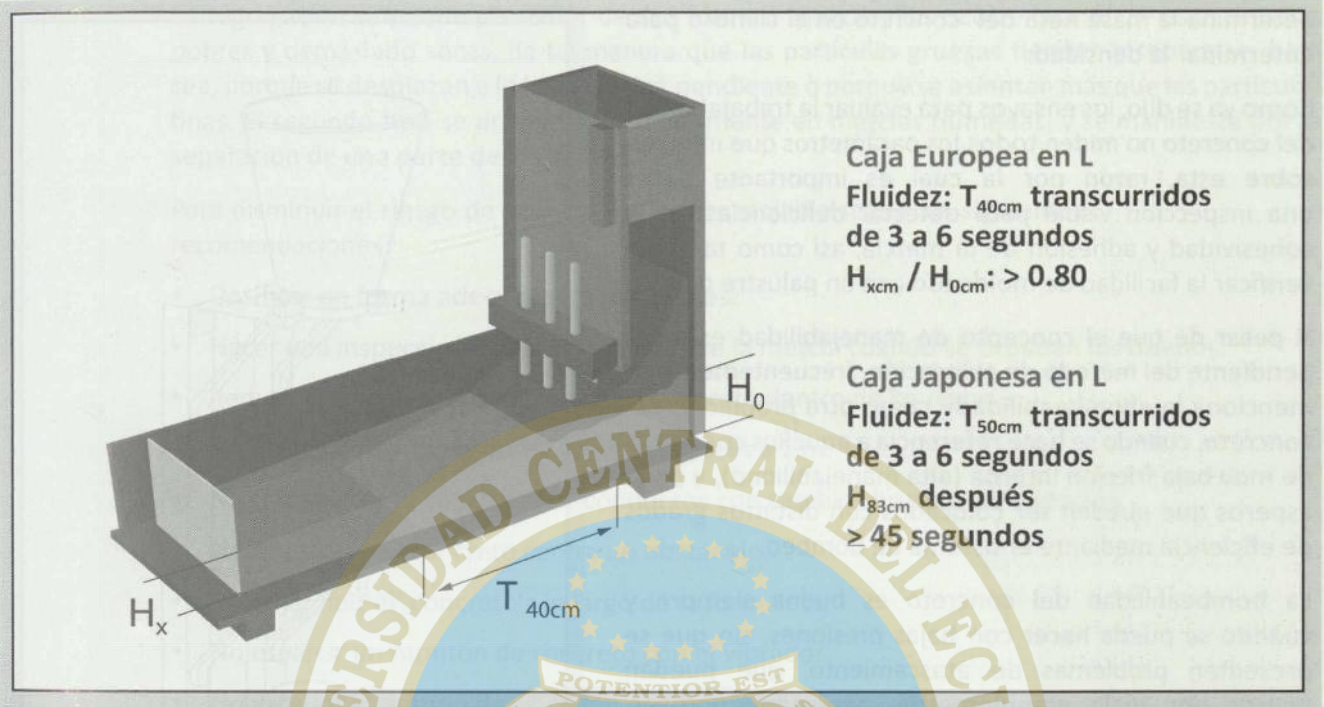


Figura 7.7 Cajas ensayo control de fluidez.

en la resistencia a la penetración del concreto y básicamente consta de un cilindro de masa constante con punta esférica que se deja hundir en este por la acción de su propia masa. Los resultados se expresan con la profundidad que se alcanza.

La importancia de este método frente al ensayo de asentamiento, que tradicionalmente se usa en obra, radica en que la medición de la penetración con la esfera de Kelly se puede realizar sobre concreto que esté en una carretilla e incluso dentro de la formaleta, caso en el cual se debe tener como mínimo una profundidad de 200 mm y un ancho de 460 mm.

No existe una correlación simple entre el ensayo de asentamiento y el de la bola de Kelly, ya que el primero evalúa la trabajabilidad midiendo la consistencia, y el segundo determinando la resistencia a la penetración.

El factor de compactación se determina por la relación de densidad antes del ensayo comparado con la densidad del mismo concreto completamente compactado. Este ensayo, que está descrito en la norma (BS188) se realiza mediante el aparato de la figura 7.8, el cual tiene dos tolvas y un cilindro.

El procedimiento es el siguiente: la tolva superior se llena de concreto de una manera cuidadosa, de tal manera que no se produzca ninguna compactación allí.

Posteriormente se abre la puerta inferior de la tolva y el concreto que cae a la segunda tolva es enrasado y el excedente es retirado. El paso que sigue, consiste en abrir la puerta inferior de la segunda tolva y retirar el exceso de concreto y nivelar la superficie del cilindro, finalmente se

determina la masa neta del concreto en el cilindro para determinar la densidad.

Como ya se dijo, los ensayos para evaluar la trabajabilidad del concreto no miden todos los parámetros que influyen sobre esta, razón por la cual es importante hacer una inspección visual para detectar deficiencias en la cohesividad y adhesión de la mezcla, así como también verificar la facilidad de moldeado con un palustre o llana.

A pesar de que el concepto de manejabilidad es independiente del método de colocación, frecuentemente se menciona la «bombeabilidad» como otra propiedad del concreto, cuando se hace referencia a aquellos concretos de muy baja fricción interna (alta manejabilidad), y poco ásperos que pueden ser colocados con distintos grados de eficiencia mediante el sistema de bombeo.

La bombeabilidad del concreto es buena siempre y cuando se pueda hacer con bajas presiones, sin que se presenten problemas de atascamiento, que pueden ocurrir por mala granulometría, agregados porosos, alto contenido de agua, demasiados finos, tiempos de fraguado no controlados, reducciones del diámetro de la tubería y continuas paradas.

El concreto se utiliza con diferentes grados de trabajabilidad dependiendo del sistema de construcción y del equipo utilizado para transportarlo y compactarlo. Razón por la cual, una buena manejabilidad para usarlo bajo determinadas circunstancias, no es necesariamente adecuada para todos los sistemas de colocación. Por ejemplo, las operaciones de instalación de losas, son diferentes a las necesarias para poner concreto en columnas con congestión de refuerzo o vigas postensionadas.

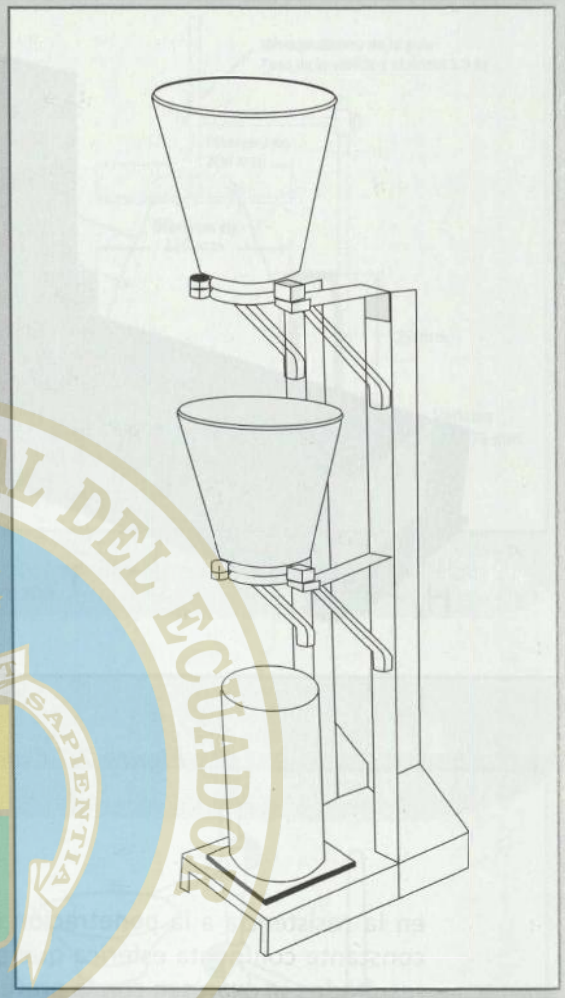


Figura 7.8. Aparato para determinar el factor de compactación.

Segregación

Un aspecto importante de la trabajabilidad y que generalmente se considera como otra propiedad, es la inclinación a la segregación, definida como la tendencia de separación de las partículas gruesas de la fase mortero del concreto y la colección de esas partículas deficientes de mortero en el perímetro del concreto colocado, esto por su falta de cohesividad, con lo cual su distribución y comportamiento deja de ser uniforme y homogéneo. Esto conduce a que la no segregación sea una condición implícita del concreto para mantener una trabajabilidad adecuada.

De otra parte, las principales causas de segregación que se presentan son: la diferencia de densidades entre sus componentes, el tamaño y forma de las partículas y la distribución granulométrica, también pueden influir otros factores como un mal mezclado, un inadecuado sistema de transporte, una colocación deficiente y un exceso de vibración en la compactación. Para poder controlar la segregación debida a efectos externos al concreto el comité ACI-304 describe una serie de procedimientos.

La segregación se puede presentar de dos formas. Una de ellas ocurre cuando se usan mezclas pobres y demasiado secas, de tal manera que las partículas gruesas tienden a separarse, bien sea, porque se desplazan a lo largo de una pendiente o porque se asientan más que las partículas finas. El segundo tipo se presenta particularmente en mezclas húmedas, y se manifiesta por la separación de una parte de los agregados.

Para disminuir el riesgo de segregación es aconsejable seguir las siguientes recomendaciones:

- Dosificar en forma adecuada los materiales.
- Hacer una inspección visual del aspecto de la mezcla cuando se prueban los diseños.
- Reducir las distancias de acarreo del concreto dentro de las obras.
- No arrojar el concreto desde alturas mayores a 1 m.
- No transportar el concreto por conductos con cambios bruscos de dirección.
- No descargar el concreto contra un obstáculo.
- No dejar fluir el concreto a lo largo de la formaleta.
- No esparcir un montón de concreto con el vibrador.
- No exceder el tiempo de vibración del concreto.
- No utilizar agregado grueso cuya densidad difiera apreciablemente del fino.

Exudación o sangrado

Es una forma de segregación o sedimentación, en la cual parte del agua de mezclado tiende a elevarse a la superficie de una mezcla de concreto recién colocado. Esto obedece a que los constituyentes sólidos de la mezcla no pueden retener toda el agua cuando se asientan durante el proceso de fraguado.

La exudación del concreto está influenciada por las proporciones de la mezcla y las características de los materiales, el contenido de aire, el uso de aditivos convencionales o minerales y particularmente por la angularidad y gradación del agregado fino.

Cuando este fenómeno se presenta en una alta tasa, se convierte en poco deseable, especialmente para bombear y dar acabado al concreto, porque la mezcla tiende a pegarse a las tuberías y herramientas con que se proporciona el acabado. Adicionalmente, trae otras consecuencias nocivas, como el debilitamiento de la parte superior de una porción de concreto que se vuelve demasiado húmeda y se traduce en disminución de las propiedades del concreto superficial, mayor porosidad, menor resistencia a la abrasión y al ataque de agentes agresivos presentes en el ambiente. Por otro lado, si la evaporación de agua en su superficie es más rápida que la velocidad de exudación, se producen fisuras de retracción.

Otro problema que se crea con la evaporación del agua es que puede quedar atrapada debajo de las partículas gruesas de agregado o del acero de refuerzo, esto genera zonas de baja adherencia y por lo tanto una eventual disminución en la resistencia. Adicionalmente, cuando sale el agua forma conductos capilares que incrementan la permeabilidad del concreto. Pero, no en todos los casos la exudación es indeseable, por ejemplo, los procesos de concreto al vacío, se facilitan si se tiene una alta tasa y cantidad de exudación ya que el agua puede ser removida con mayor comodidad.

Cuando la exudación es excesiva, debe prestarse atención especial a las características de gradación y angularidad de la arena y las proporciones de la mezcla. Si se desea reducir la exudación se recomienda utilizar arenas finas, mejorar el control y gradación de las arenas trituradas, incrementar la cantidad de cemento o el contenido de puzolanas, usar cemento de mayor finura o con alto contenido de álcalis o C_3A, y usar aditivos convencionales e inclusores de aire.

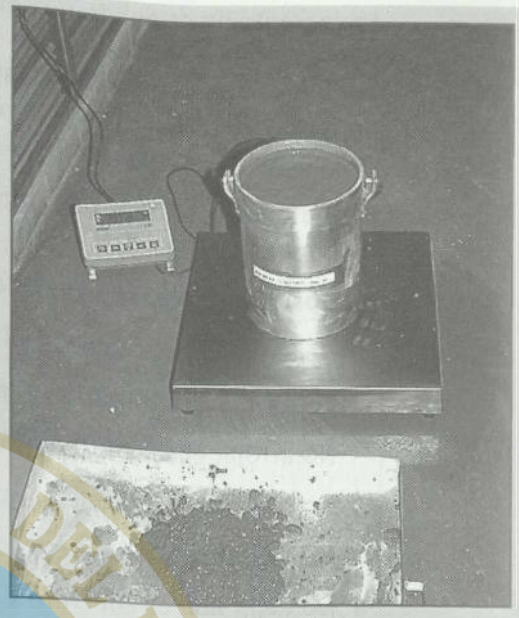


Figura 7.9 Ensayo de exudación

- **Ensayo para determinar la exudación**

Las normas NTC 1294 (ASTM C232) comprenden dos métodos para determinar las propiedades de exudación del concreto fresco. Un método compacta el espécimen por apisonamiento sin perturbaciones posteriores y el otro lo hace por vibración luego de la cual el espécimen es vibrado de manera intermitente durante el ensayo. La cantidad de agua de exudación en la superficie se expresa como el volumen de agua por área unitaria del concreto descubierto, o como el porcentaje de la cantidad neta de mezclado en el espécimen del ensayo. Este ensayo rara vez se realiza en campo.

Masa unitaria fresca

La masa unitaria del concreto fresco y del endurecido depende del tamaño máximo, granulometría y densidad de los agregados, así como también de la cantidad de aire atrapado e incorporado y del contenido de agua y cemento.

La densidad y cantidad de cada agregado afecta la masa unitaria del concreto en estado fresco. Cuando estos son de muy alta porosidad, la masa unitaria del concreto puede variar dependiendo del grado de saturación de los agregados antes de la mezcla.

- **Ensayo para determinar la masa unitaria fresca**

En el concreto de masa normal, se mide mediante el ensayo de rendimiento volumétrico descrito en la norma NTC 1926, que consiste en determinar la masa requerida para llenar un molde de volumen conocido.

Dicho molde se debe llenar en tres capas de igual altura, compactadas por vibrac ión o usando una varilla apisonadora. En este último caso, hay que tener la precaución de golpear con un martillo cada capa con el objeto de cerrar los vacíos dejados por la varilla. El nivelado de la placa se hace con una lámina metálica o de vidrio, teniendo cuidado de que la medida quede llena justamente al nivel de los bordes del molde. Las muestras no se deben enrasar empleando varilla o palustre, porque con estos instrumentos el concreto superficial queda comprimido, lo cual origina una masa unitaria más alta (menor rendimiento).

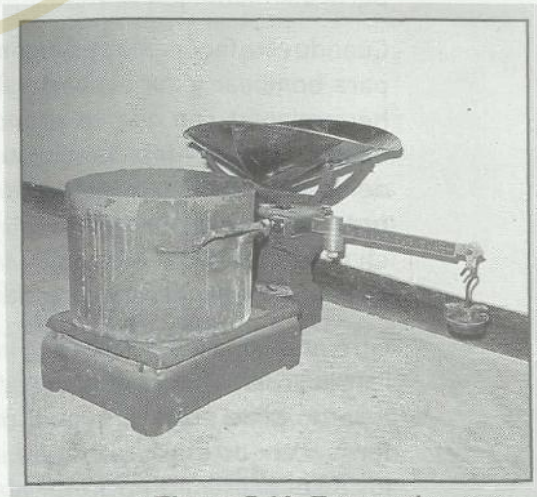


***Figura 7.10.** Ensayo de rendimiento volumétrico.*

La masa unitaria real del concreto se obtiene mediante el cociente de la masa neta del concreto y el volumen del recipiente. El valor neto se determina restando la tara del recipiente a la masa del concreto más el recipiente (masa bruta).

El rendimiento o volumen producido de concreto (Y), es el cociente entre la masa total de los materiales mezclados (W_1) y la masa unitaria real del concreto (W).

$$Y = \frac{W_1}{W}$$

Donde:

Y	=	Volumen producido, en m^3
W_1	=	Masa total de materiales mezclados, en kg
W	=	Masa unitaria real, en kg

La masa total de los materiales mezclados incluye la masa del cemento, los agregados (en las condiciones de humedad con que se emplearon), el agua y cualquier otro material sólido o líquido que sea adicionado inmediatamente antes o durante la mezcla.

El rendimiento relativo del concreto se calcula como la relación que hay entre el volumen producido (Y) y el volumen de diseño de la mezcla.

$$R_y = \frac{Y}{Yd}$$

Donde:

Ry	=	Rendimiento relativo, en tanto por 1
Y	=	Volumen producido, en m^3
Yd	=	Volumen de diseño de la mezcla, en m^3

Un valor de Ry mayor de 1,0 significa que se ha producido un exceso de concreto y un valor menor indica que se ha quedado corto.

De acuerdo a lo anterior el contenido real de la mezcla es:

$$N = \frac{N_t}{Y}$$

Donde:

N	=	Contenido de cemento real, en kg/cm^3 de concreto
N_t	=	Masa de cemento empleada, en la mezcla, en kg
Y	=	Volumen producido, en m^3

La densidad del concreto fresco así como la del endurecido se puede determinar mediante métodos nucleares, como lo describe la norma ASTM C1040.

Contenido de aire

Este elemento está presente en todos los tipos de concreto, localizado en los poros no saturables de los agregados y formando burbujas entre los componentes del concreto, bien sea porque

es atrapado durante el mezclado o al ser intencionalmente incorporado por medio del uso de agentes inclusores, tales como cementos o aditivos incorporadores de aire.

El contenido de aire de un concreto sin agentes inclusores normalmente está entre el 1% y el 2% del volumen de la mezcla, mientras que en un concreto con inclusores pueden obtenerse contenidos de aire entre el 4% y el 8%.

Los factores que afectan la cantidad de aire en el concreto son dos: uno es la cantidad de material pasa tamiz 75 µm (Nº 200) y el segundo es la materia orgánica. Por un lado, el contenido de material pasa tamiz 75 µm (Nº 200), particularmente en forma de arcilla, puede reducir el contenido de aire en el concreto, y cuando existe materia orgánica contenida en algunos agregados, puede ayudar a atrapar burbujas de aire que son indeseadas y aumentar la capilaridad del concreto. El uso de agregado grueso o fino «sucio» es la variable más importante para causar variaciones en el contenido de aire.

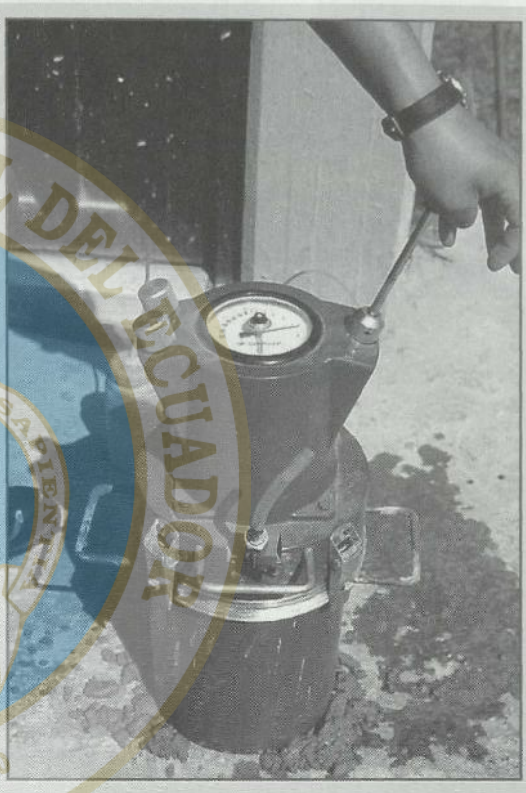


Foto 7.11. Ensayo de contenido de aire

- **Aire atrapado**

El aire es atrapado de manera natural durante el proceso de mezclado. En algunos casos su contenido se incrementa a consecuencia de una deficiente colocación o compactación. El contenido depende de las propiedades del agregado.

Los vacíos dejados por el aire atrapado normalmente tienen diámetros mayores a 1 mm, lo cual es un problema para el concreto, pues disminuye la resistencia, reduce las secciones efectivas de los elementos y causa mal aspecto.

- **Aire incorporado o incluido**

Son burbujas microscópicas de aire que se incluyen intencionalmente al concreto durante la preparación, con las cuales se busca mejorar la manejabilidad y disminuir el riesgo de exudación y segregación en estado fresco y aumentar la durabilidad en el concreto endurecido.

- **Ensayos para determinar el contenido de aire**

Las normas presentan tres procedimientos para medir el contenido de aire del concreto en estado fresco: el de presión (normas NTC 1028 y ASTM C173), el volumétrico (normas NTC 1032 y ASTM C231) y el gravimétrico (norma NTC 1926). Es recomendable para todos los métodos iniciar la medición del contenido de aire dentro de los cinco minutos que siguen la obtención de la muestra.

A pesar de que estos ensayos miden únicamente el volumen de aire sin considerar las características de los vacíos del aire, por medio de ensayos de laboratorio se ha encontrado que estos métodos son indicativos respecto a la forma del sistema de vacíos.

Método de presión

Está basado en la Ley de Boyle, donde se relaciona la presión con el volumen. Muchos medidores comerciales de aire de este tipo, están calibrados para leer el contenido de aire directamente cuando

se aplica una presión predeterminada y la única precaución que hay que tener para hallar la cantidad precisa en el concreto fresco, es la de aplicar los factores de corrección para los agregados, aunque en caso de agregados de masa normal sean relativamente constantes y pequeños.

La presión aplicada comprime el aire dentro de la muestra de concreto, incluyendo al que se encuentra en los poros de los agregados. Razón por la cual, los ensayos con este método no son adecuados para determinar el contenido de aire de los concretos de baja densidad o elaborados con materiales muy porosos.

Los medidores de este tipo deben calibrarse para diversas altitudes sobre el nivel del mar para poderlos usar en sitios que tengan apreciables diferencias de altitud, algunos utilizan el cambio de presión de un volumen conocido de aire y no resultan afectados por los cambios de altura. Los medidores de presión son usados ampliamente porque no es necesario conocer las proporciones de la mezcla, ni las masas unitarias del material.

La figura 7.12 muestra el esquema de los medidores de presión tipo A y B que pueden ser utilizados cuando se sigue el procedimiento de la norma.

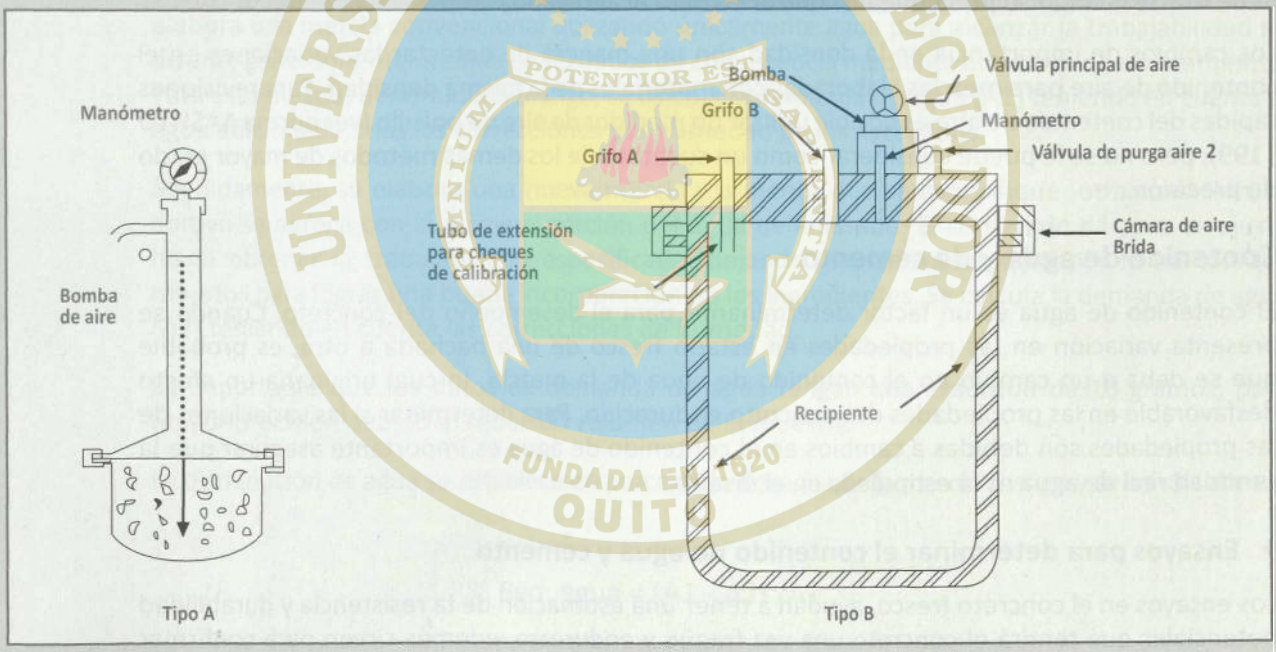


Figura 7.12 Medidores de presión tipo A y tipo B

Método volumétrico

El método volumétrico, descrito en la norma NTC 1032 (ASTM C231), requiere la remoción del aire de un volumen conocido de concreto agitándolo dentro de un exceso de agua. A diferencia del método de presión, este se puede usar para concretos que tengan cualquier tipo de agregado, incluyendo materiales ligeros o porosos, y los resultados no son afectados por la presión atmosférica.

Método gravimétrico

Este proceso emplea el mismo equipo del ensayo usado para la determinación del rendimiento del concreto fresco (NTC 1926) y expresa el contenido de aire como un porcentaje del volumen total de concreto como sigue:

$$A = \frac{P - W \times 100}{P}$$

Donde:

A = Contenido de aire en el concreto (Porcentaje de vacíos)
P = Masa teórica del concreto calculada con la suposición de que está libre de aire, kg/m³
W = Densidad real en kg/m³

Tanto las proporciones de la mezcla como las densidades deben conocerse con gran exactitud, porque de otra manera los resultados serán erróneos. En consecuencia, este método solamente debe usarse cuando se practique un control estricto al agregado.

Los cambios de importancia en la densidad son una manera de detectar las variaciones en el contenido de aire para mezclas elaboradas con materiales de la misma densidad. Para revisiones rápidas del contenido de aire es posible utilizar un medidor de aire de bolsillo (ver norma AASHTO T199), pero no se le puede considerar como un sustituto de los demás métodos de mayor grado de precisión.

Contenido de agua y de cemento

El contenido de agua es un factor determinante para el desempeño del concreto. Cuando se presenta variación en las propiedades en estado fresco de una bachada a otra, es probable que se deba a un cambio en el contenido de agua de la mezcla, lo cual originaría un efecto desfavorable en las propiedades del concreto endurecido. Para determinar si las variaciones de las propiedades son debidas a cambios en el contenido de agua es importante asegurar que la cantidad real de agua es la estipulada en el diseño.

- **Ensayos para determinar el contenido de agua y cemento**

Los ensayos en el concreto fresco, ayudan a tener una estimación de la resistencia y durabilidad potenciales que tendrá el concreto una vez fragüe y endurezca, además sirven para confirmar que se ha cumplido con los contenidos de diseño de agua y de cemento.

La norma ASTM C1078 describe dos métodos para determinar el contenido de cemento de una muestra de concreto fresco con base en la correlación que existe entre el contenido de ión calcio y el contenido de cemento.

Los dos métodos separan el cemento mediante tamizado por vía húmeda de la mezcla de concreto, lo disuelven en ácido nítrico para determinar la concentración del ión calcio por medio de titulación manual (método A) o determinación instrumental fluorométrica (método B).

El inconveniente de este ensayo puede ser que las partes finas (Pasa Tamiz 150 µm (Nº 100)) del agregado calcáreo reaccionen con el ión calcio y los resultados pueden dar valores más altos de los reales.

Las normas NTC 3752 y ASTM C1079 incluyen dos procedimientos para hallar la cantidad de agua, en los cuales se mide la concentración del ión cloruro resultante de la reacción química de la mezcla de concreto, con una solución de cloruro de volumen y características determinadas. La cantidad de ión cloruro es determinada por medio de una solución de nitrato de plata (método A) o una solución ácida padrón (método B).

El contenido de cemento también se puede determinar con el ensayo de la máquina de análisis rápido, que fue creada por la Cement and Concrete Association o por medio de la prueba de Willis-Hime.

- **Ensayo de reducción de agua**

Es un procedimiento comparativo entre una mezcla testigo y una mezcla con diferentes aditivos plastificantes o superplastificantes, para evaluar el poder reductor de agua del aditivo en cuestión y por ende todas las demás características afines con la reducción de agua.

A través de este ensayo también se pueden determinar dosis óptimas de aditivos, o evaluar combinaciones para lograr efectos especiales en el concreto.

El procedimiento del ensayo consiste en que sobre un diseño de mezcla preestablecido, se elabora una mezcla convencional utilizando únicamente agua para alcanzar la trabajabilidad de diseño, generalmente medida en términos de consistencia mediante el ensayo de asentamiento. Para esta mezcla, denominada testigo, se calcula la demanda de agua (A1) teniendo en cuenta el agua adicionada, más las correcciones por humedad de los agregados.

Seguidamente, se elabora una nueva mezcla y a menos que se especifique otra condición, el aditivo se agrega con la primera porción del agua de amasado. El contenido de agua se ajusta hasta obtener la trabajabilidad especificada, dejando girar la mezcladora por lo menos dos minutos para lograr una buena incorporación de los ingredientes. Se calcula la demanda de agua (A2) teniendo en cuenta las correcciones de humedad.

Es importante que los datos de demanda de agua tengan una exactitud de 10 gramos, para mayor precisión debido al reducido volumen de la muestra.

La disminución de agua se establece en porcentaje del agua de la mezcla testigo y se calcula como:

$$\% \text{ Red. agua} = (A1 - A2) / A1$$

Este procedimiento se puede repetir para diferentes dosificaciones de aditivo o mezcla de los mismos, evaluando las reducciones de agua pero controlando otros parámetros como tiempo de fraguados y evolución de resistencias en particular.

Proceso de fraguado

Durante el fraguado el concreto pasa de un estado plástico, donde se deforma indefinidamente por la aplicación de carga, a uno en que se comporta de manera elástica ante la acción de la misma. Los cambios que se pueden observar en el concreto durante este proceso son el tiempo de fraguado y la contracción plástica.

Tiempo de fraguado

Al considerar el cambio de estado plástico al endurecido del concreto, de acuerdo con la regulación de los tiempos de mezclado, transporte, colocación y compactación, se encuentra que hay que ajustar los tiempos a los intereses particulares de las personas que trabajan con este material.

Para el productor, es necesario que el concreto llegue a la obra con el grado de manejabilidad deseado y debe proporcionar la mezcla, para no correr el riesgo de que el concreto fragüe dentro del camión por demoras ocasionadas por factores externos, tales como tráfico o fallas mecánicas del camión. Para el constructor es importante que el concreto pueda ser vibrado hasta cierto tiempo después de depositado en las formaletas o encofrados y así remover los encofrados lo más rápido posible para utilizarlos en otros puntos de la obra. Para un prefabricador puede ser deseable que el concreto fragüe rápido para usar más veces al día los moldes y poder mover los elementos prefabricados a los patios de almacenamiento a las pocas horas de vaciados.

La clasificación de acuerdo con el tiempo de fraguado se hace en concretos de fraguado lento, normal y rápido. Los de fraguado lento son aquellos que al incluir un aditivo retardante demoran más en endurecer. Los de fraguado normal son los adicionados con aditivos reductores de agua que endurecen prácticamente con la misma velocidad que un concreto sin aditivo. Por último, los concretos acelerados son los que endurecen más rápido debido a la adición de aditivos acelerantes que permiten que la mezcla fragüe mucho más rápido que una normal.

- **Ensayos para determinar el tiempo de fraguado**

Se ha encontrado que el tiempo de fraguado del cemento se puede utilizar como índice del tiempo de fraguado del concreto, correlacionándose razonablemente con el del mortero.

Como en el caso del cemento, el tiempo de fraguado del concreto es necesariamente un valor arbitrario tomado en algún punto del proceso gradual de endurecimiento, definido en términos de un método de ensayo y un aparato particular. Se han propuesto varios métodos entre los que se incluyen medidas de resistencia eléctrica, consistencia, velocidad de onda, características de exudación, calor de hidratación, cambios de volumen, tiempo límite de replastificación por vibración, y resistencia a la penetración.

De los anteriores métodos, las normas NTC 890 y ASTM C403 describen el de la resistencia a la penetración para concretos con asentamientos mayores que cero. Este ensayo es similar al efectuado con la aguja de Vicat, y consiste en tomar una muestra de mortero procedente del tamizado a través de una malla de 4,76 mm (No. 4) en una porción de concreto fresco. Se somete periódicamente a la penetración de agujas de punta plana cuyas áreas varían entre 645 y 16 mm; se determina para que la aguja penetre 25 mm dentro del concreto y se registra el tiempo a partir del momento de mezclado y se dibuja una curva que tenga en el eje X el

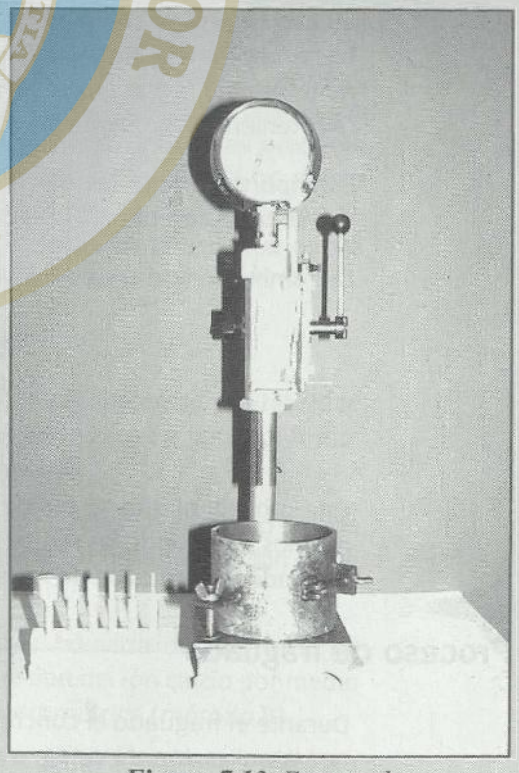


Figura 7.13. *Ensayo de fraguado del concreto*

tiempo y en el eje Y el esfuerzo a la penetración, calculado como el cociente entre la fuerza aplicada y el área de la aguja, tal como la que se muestra en la figura 7.14.

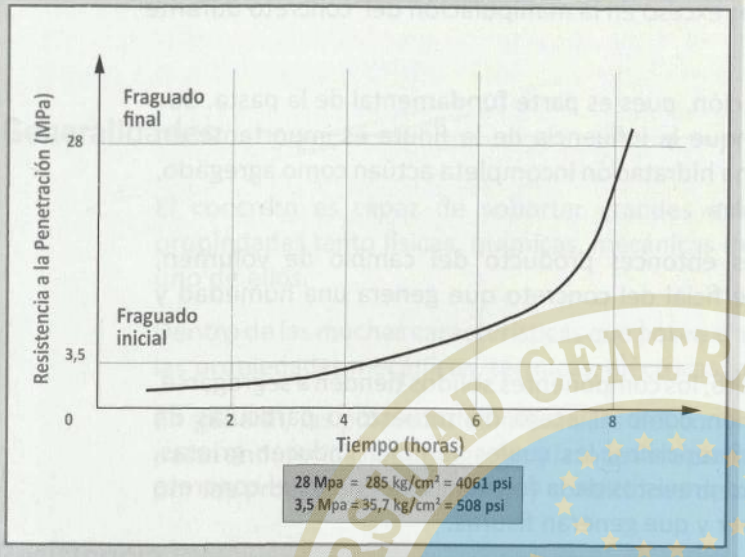


Figura 7.14. Tiempo de fraguado

De dicha curva se toma como tiempo de fraguado inicial aquel cuya resistencia a la penetración es de 3,5 MPa (35 kg/cm²) y como tiempo de fraguado final aquel que alcanza un valor de 28 MPa (285 kg/cm²). Estos puntos, arbitrariamente escogidos, son de mucha ayuda en estudios comparativos de varios factores y en la especificación de límites en la velocidad de endurecimiento del concreto que se está realizando. La penetración de 3,5 MPa corresponde a la «vibración límite», después de la cual el concreto no puede replastificarse por vibración. El valor de 28 MPa corresponde a la resistencia a la compresión de un mortero de aproximadamente 0,7 MPa (100 psi). Una vez se obtiene el fraguado final, al igual que sucede con el cemento, se dice que comienza el endurecimiento del concreto.

Los parámetros que mayor incidencia tienen sobre el tiempo de fraguado son: el tipo de cemento utilizado, y la temperatura ambiente y la del concreto. De tal forma, que el fraguado de un concreto elaborado con cemento tipo 3 es más rápido. Por otro lado, en climas fríos, el proceso de hidratación del cemento es más lento con el consecuente retardo del tiempo de fraguado, mientras que cuando la temperatura es elevada, se reduce esta duración con un consiguiente aumento de la resistencia a muy temprana edad.

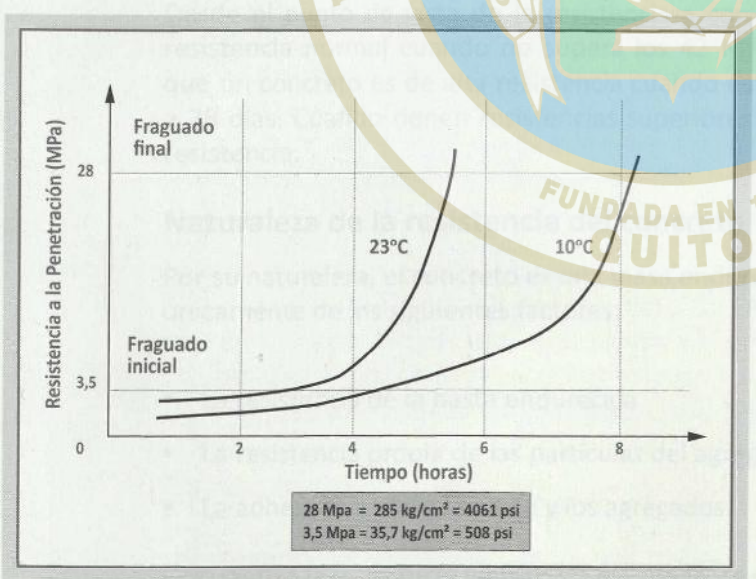


***Figura 7.15.** Efecto de la temperatura sobre el tiempo de fraguado*

El tiempo de fraguado normalmente no es afectado por el agregado, sin embargo, la presencia de sales solubles o materia orgánica pueden influenciar esta propiedad.

En la figura 7.15. se muestra un ejemplo del efecto de la temperatura sobre el tiempo de fraguado del concreto.

Contracción plástica

Los cambios de volumen producidos durante el fraguado, se manifiestan por la aparición de fisuras y son debidos a una reducción en el volumen del sistema «cemento más agua», causado tanto por el inicio del proceso de hidratación como por la pérdida de agua de

mezclado por evaporación. Este fenómeno se conoce como contracción plástica y ocurre con más frecuencia en superficies horizontales en donde la relación volumen/área es baja, también en condiciones climáticas no favorables (alta velocidad del viento, alta temperatura y baja humedad del medio ambiente), al igual que por exceso en la manipulación del concreto durante su colocación, compactación y acabado.

El contenido de cemento influye en la contracción, pues es parte fundamental de la pasta. Sus propiedades tienen pocas consecuencias, aunque la influencia de la finura es importante en granos con más de 75 µm, los cuales al tener una hidratación incompleta actúan como agregado, ejerciendo una restricción al cambio de volumen.

El agrietamiento por contracción plástica es entonces producto del cambio de volumen, ocasionado por la desecación de la capa superficial del concreto que genera una humedad y rigidez diferencial con su interior.

Inmediatamente después de colocado el concreto, los componentes sólidos tienden a segregarse, si este movimiento presenta alguna restricción como el acero de refuerzo o partículas de agregado grueso, se crean asentamientos diferenciales, los cuales también inducen grietas. Por otra parte, si se presentan movimientos no previstos de la formaleta del suelo, el concreto presenta deformaciones que no puede absorber y que generan fisuras.

Los principales factores endógenos que afectan la cuantía de contracción por secado son el contenido de agua de mezcla y el contenido de agregados. Este último, afecta la magnitud de retracción, ya que en la medida que se incrementa el contenido de agregado, más se restringe la contracción de la pasta.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM ALMA MATER ALMENTA
FUNDADA EN 1620
QUITO

PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO

Capítulo 8

Generalidades

El concreto es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión, dependiendo de las propiedades tanto físicas, químicas, mecánicas de sus componentes y de la interacción de cada uno de ellos.

Dentro de las muchas características que posee el concreto se puede mencionar: la masa unitaria, las propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas, acústicas; su apariencia, etc.

En general, las propiedades mecánicas del concreto están gobernadas por la resistencia de la pasta endurecida, los agregados y la interfase pasta-agregados, las cuales a su vez son modificadas por los procesos de colocación y condiciones de curado.

Resistencia

Es una habilidad para resistir esfuerzos y de allí que se pueda considerar de cuatro maneras: compresión, tracción, flexión y corte. El concreto presenta una alta resistencia a los esfuerzos de compresión y muy poca a los de tracción, razón por la cual, la resistencia a la compresión simple es la propiedad a la que se le da mayor importancia.

Desde el punto de vista de la resistencia a compresión se considera que un concreto es de resistencia normal cuando no supera los 42 MPa. Por otra parte, actualmente se considera que un concreto es de alta resistencia cuando esta es superior a 42 MPa e inferior a 100 MPa, a 28 días. Cuando tienen resistencias superiores a 100 MPa se consideran como de ultra alta resistencia.

Naturaleza de la resistencia del concreto

Por su naturaleza, el concreto es una masa endurecida y heterogénea cuya resistencia depende únicamente de los siguientes factores:

- La resistencia de la pasta endurecida
- La resistencia propia de las partículas del agregado y,
- La adherencia entre la pasta y los agregados.

En cuanto a la resistencia de la pasta hidratada, se conoce que el cemento al contacto con el agua se hidrata y forma una masa semicristalina discontinua llamada «gel», que con el transcurso del tiempo adquiere resistencia, la cual será mayor a medida que se incrementa el grado de hidratación.

En lo que se refiere a la resistencia de las partículas del agregado, esta es función de sus propiedades, las cuales están bien definidas y son independientes del tiempo. Generalmente

los agregados son más resistentes que la pasta, excepto en el caso de agregados livianos (ligeros) o concretos de alta resistencia.

La adherencia entre la pasta de cemento y los agregados se debe a que durante el proceso de fraguado y endurecimiento, se genera una superficie de cohesión producida por la trabazón entre los agregados y la pasta. La interacción entre los dos elementos, además de variar con el tiempo, algunas veces lo hace también con la composición mineral de los materiales, en cuya acción se presentan fenómenos tanto físicos como químicos. La zona de contacto, llamada interfase «agregado-matriz», es la fase más importante del concreto que establece el enlace crítico y normalmente se constituye en el elemento más débil de la masa endurecida.

Factores que inciden en la resistencia

En general, el más importante en la resistencia de un concreto totalmente compactado es la relación agua/cemento. Sin embargo, para una mezcla trabajable, bien dosificada y en condiciones normales de mezclado, curado y métodos de ensayo, además de la influencia de la relación agua/cemento, intervienen otros elementos como el tipo y calidad del cemento, las características del agregado, el tipo y cantidad de los aditivos, el fraguado y la edad.

- **Relación Agua - Cemento**

Un factor que hasta ahora se ha tocado de manera tangencial y que tiene gran influencia en todas las propiedades del concreto es la relación agua/cemento (o agua/material cementante).

La relación agua/cemento (a/c) en una mezcla de mortero o concreto se describe como la cantidad de agua en masa, sin incluir el agua absorbida por los agregados, sobre la cantidad de cemento en masa.

La aparición y aplicación generalizada de las adiciones minerales, tales como la microsílica y la escoria de alto horno, ha forzado a que en el denominador de la relación a/c se use la totalidad del material cementante, puesto que, aunque en dosis aparentemente bajas, modifican el comportamiento del concreto de manera sustancial. En este texto se ha utilizado la expresión relación agua/cemento (a/c), pero se entiende que en la mezclas con adiciones minerales el denominador corresponde al material cementante.

La resistencia del concreto está estrechamente relacionada con la relación a/c, de tal manera, que entre mayor sea el contenido de agua de mezclado, mayor será la cantidad que no se cambia con el cemento, y por consiguiente, al disiparse la parte de agua evaporable la pasta será más porosa y la resistencia del concreto disminuirá. De acuerdo con este principio se han desarrollado gráficas y fórmulas que la correlacionan con la resistencia a la compresión, de acuerdo con las condiciones específicas en cuanto a materiales, producción y ensayos.

Esta propiedad fue demostrada por Duff Abrams en el año de 1918, señalando que para un concreto perfectamente compactado, empleando materiales con las mismas características y condiciones de ensayo, la resistencia, a una edad dada, es inversamente proporcional a la relación agua/cemento. Dicha ley la expresó matemáticamente en forma logarítmica de la siguiente manera:

$$R = \frac{A}{B^{a/c}}$$

donde:

R	=	Resistencia a la compresión
A, B	=	Constantes empíricas para unas determinadas condiciones
a/c	=	Relación agua/cemento en masa

Si se representa gráficamente la resistencia a la compresión en función de la relación agua/cemento, se aprecia que toma forma aproximadamente hiperbólica (ver figura 8.1). Esto es válido para concreto elaborado con materiales de características determinadas y a una edad dada.

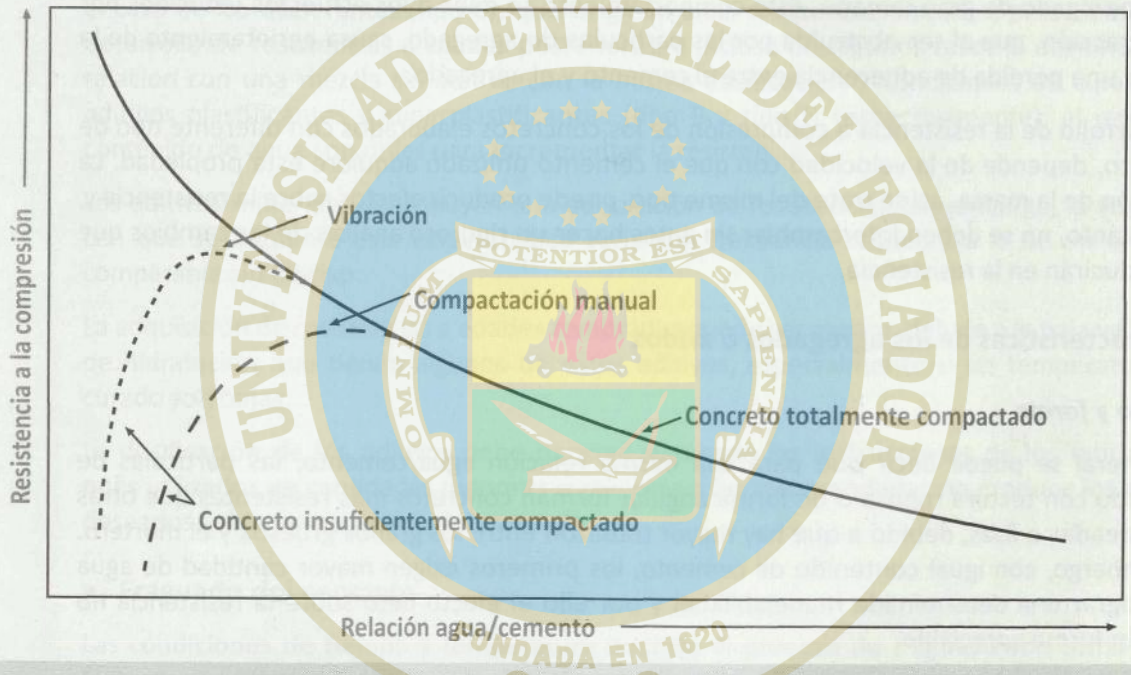


Figura 8.1. Resistencia a compresión en función de la relación a/c.

Se puede observar que cuanto menor es la relación agua/cemento, mayor es la resistencia, sin embargo al emplear relaciones agua/cemento muy bajas la mezcla se vuelve más seca y difícil de compactar quedando porosa, al punto que la resistencia comienza a decrecer. Obviamente, cuando la compactación se hace con vibrador, se pueden utilizar relaciones agua/cemento menores que las empleadas con compactación manual.

Lo curioso es que en la práctica, muchas veces se utilizan materiales con características distintas a las previstas en el diseño de la mezcla, lo que conduce a resistencias distintas con la misma relación agua/cemento. Por esta razón se hace indispensable efectuar ensayos con los materiales que realmente van a ser utilizados en una obra específica, para simular las condiciones a que estará expuesto el concreto, y desarrollar gráficas que determinan la relación real entre la resistencia y la relación agua/cemento.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

- **Contenido y tipo de cemento**

El contenido y tipo de cemento utilizado tiene gran influencia en la resistencia que finalmente conseguirá el concreto, debido a que el cemento es el material químicamente «activo» en la mezcla.

Lo más importante en lo que respecta al cemento es su contenido dentro del concreto, porque en la medida que se aumenta se consiguen mayores resistencias. Esta afirmación se debe aplicar con precaución, porque sólo es válida hasta un límite, a partir del cual, la cantidad de cemento por encima de este no se hidrata totalmente y por tanto pasa a formar parte del concreto como un material inerte de relleno. Por otro lado, se ha demostrado que para mezclas con una baja relación agua/cemento, en las cuales se incrementa el contenido de este material a valores superiores a 470 kg/m^3, se origina una disminución de la resistencia, en especial cuando se utiliza agregado de gran tamaño. Este comportamiento se debe a los esfuerzos inducidos por la contracción, que al ser obstruida por las partículas de agregado, causa agrietamiento de la pasta o una pérdida de adherencia entre el cemento y el agregado.

El desarrollo de la resistencia a compresión de los concretos elaborados con diferente tipo de cemento, depende de la velocidad con que el cemento utilizado adquiere esta propiedad. La variación de la marca, así se trate del mismo tipo, puede producir efectos sobre la resistencia y, por lo tanto, no se deben intercambiar sin antes hacer un riguroso análisis de las cambios que se producirán en la resistencia.

- **Características de los agregados o áridos**

Textura y forma

En general se puede decir que para una misma relación agua/cemento, las partículas de agregado con textura rugosa o de forma angular forman concretos más resistentes que otras redondeadas o lisas, debido a que hay mayor trabazón entre los granos gruesos y el mortero. Sin embargo, con igual contenido de cemento, los primeros exigen mayor cantidad de agua para lograr una determinada manejabilidad y por ello el efecto neto sobre la resistencia no varía en forma apreciable.

Granulometría

Una masa de agregados cuya granulometría sea continua, permite elaborar mezclas de alta compacidad, mucho más densas y por lo tanto se consiguen mayores resistencias.

Resistencia

Este factor y la rigidez propia de los granos de agregado, también influyen en la resistencia del concreto.

Influencia del tamaño máximo

En general, la diferencia en tamaño máximo de un mismo tipo de agregado bien gradado, tiene dos efectos opuestos en la resistencia a la compresión del concreto. En primer lugar, para una consistencia dada y para igual contenido de cemento, la utilización de tamaños máximos mayores requiere menos agua de mezclado que los agregados de tamaño máximo menores. Por otro lado, mezclas con la misma consistencia e igual relación agua/cemento, presentan

resistencias más bajas cuando se utilizan agregados de tamaño máximo mayor. En particular, se ha demostrado que para concretos de alta resistencia, mientras mayor sea la resistencia requerida, menor deberá ser el tamaño máximo. Así mismo, para concretos de baja resistencia, mientras mayor sea el tamaño máximo, mayor será la eficiencia.

Sin embargo, para concretos de resistencia intermedia, existe un rango amplio en los tamaños máximos que se pueden usar para una misma resistencia, esencialmente con igual contenido de cemento. Únicamente se requiere de mayor cantidad de cemento si se utilizan agregados de tamaños pequeños.

- **Tipo y dosificación de aditivos**

Los aditivos convencionales producen diversos efectos sobre la resistencia del concreto, como el caso de los acelerantes (tipo E), que originan altas resistencias iniciales, pero demoran el desarrollo de resistencias a edades posteriores, e incluso en algunos casos la disminuyen en relación con una mezcla sin aditivo con la misma dosificación y condiciones de curado. Los aditivos plastificantes y superplastificantes (tipo B y tipo F, respectivamente), al reducir el contenido de agua son útiles para incrementar la resistencia.

Los aditivos minerales contribuyen a la adquisición de resistencia, sin embargo, la velocidad con que se adquiere esta característica varía con frecuencia respecto a la de un concreto comparable sin aditivo.

La adquisición de resistencias a edades tempranas puede ser menor, debido a la baja velocidad de hidratación que tienen algunos de estos aditivos, especialmente si las temperaturas de curado son bajas.

La dosificación de los aditivos debe hacerse siguiendo las instrucciones de los fabricantes, pues utilizados en cantidades menores o mayores a las recomendadas no produce los efectos deseados sobre la resistencia del concreto.

- **Fraguado del concreto**

Las condiciones de tiempo y temperatura durante el proceso de fraguado son otros de los factores que afectan la resistencia del concreto. En climas fríos, como ya se dijo, el proceso de hidratación del cemento es más lento debido a que el medio ambiente le «roba» parte del calor de hidratación con el subsiguiente retardo del tiempo de fraguado y, por tanto, la adquisición de resistencia tarda.

Por el contrario, cuando la temperatura es elevada, se aumenta la resistencia a muy temprana edad, pero se disminuye aproximadamente después de los 7 días. La razón de este fenómeno, ocurre porque una rápida hidratación inicial de los granos de cemento es superficial y parece formar pasta con una estructura física más pobre y posiblemente más porosa.

- **Curado del concreto**

Se define como la prevención del secado prematuro del concreto, bajo un nivel de temperatura favorable por un período específico.

El período de curado de los elementos de concreto debe ser de por lo menos 7 días a una temperatura mínima de 10 °C y máxima de 32 °C. Este intervalo puede ser reducido en el caso de concretos de alta resistencia inicial y los acelerados a 3 días. Alternativamente, cuando se

hacen ensayos de resistencia sobre cilindros, hay que mantener el curado hasta que la resistencia sea el 70% de la resistencia especificada.

Un factor muy importante del curado es su temperatura, debido a que un aumento durante este proceso acelera las reacciones químicas de la hidratación, lo cual afecta en forma benéfica la resistencia a edades tempranas del concreto, pero con consecuencias adversas en la resistencia posterior.

La resistencia del concreto que no se cura, es inferior al que recibe este cuidado, esto ocurre porque al no proporcionar las condiciones adecuadas durante las primeras edades, la hidratación del cemento es incompleta.

Existen diferentes métodos para garantizar un contenido satisfactorio de humedad y temperatura, de tal manera que el curado puede realizarse manteniendo las superficies del concreto protegidas de las temperaturas extremas y del viento en permanente contacto con agua, además se puede emplear el riego directo o arena húmeda, o utilizando membranas protectoras o compuestos curadores. La elección del procedimiento depende de la forma del elemento, las condiciones climáticas que prevalezcan y los factores económicos.

- **Edad del concreto**

Inmediatamente después de que se presenta el fraguado del concreto, comienza el proceso de adquisición de resistencia con el transcurso del tiempo.

Para concretos convencionales se especifica que puede alcanzar la resistencia de diseño a los 28 días. La explicación es que después de dicho tiempo el aumento de resistencia es muy poco. Sin embargo, para concretos de alta resistencia se especifica a los 56 ó 90 días, porque el aumento después de los 28 días es considerable.

Es importante anotar, que la resistencia física es la propiedad más importante del concreto, porque influye en forma directa en las demás características de significado práctico. En general, los más resistentes son más densos, menos permeables, y más resistentes al intemperismo y a ciertos agentes destructivos. De otro lado, los concretos resistentes usualmente exhiben mayor contracción por fraguado y menor extensibilidad, por lo tanto son más propensos al agrietamiento.

Resistencia a la compresión

En términos generales, la gran mayoría de estructuras de concreto son diseñadas bajo la suposición de que este resiste únicamente esfuerzos de compresión, por consiguiente, para propósitos de diseño estructural, la resistencia a la compresión es el criterio de calidad, y de allí que los esfuerzos de trabajo estén prescritos por los códigos en términos de porcentajes de la resistencia a la compresión.

Resistencia a la tracción

Por su naturaleza, el concreto es bastante débil a esfuerzos de tracción, esta propiedad conduce generalmente a que no se tenga en cuenta en el diseño de estructuras normales. La tracción tiene que ver con el agrietamiento del concreto, a causa de la contracción inducida por el fraguado o por los cambios de la temperatura, ya que estos factores generan esfuerzos internos de tracción.

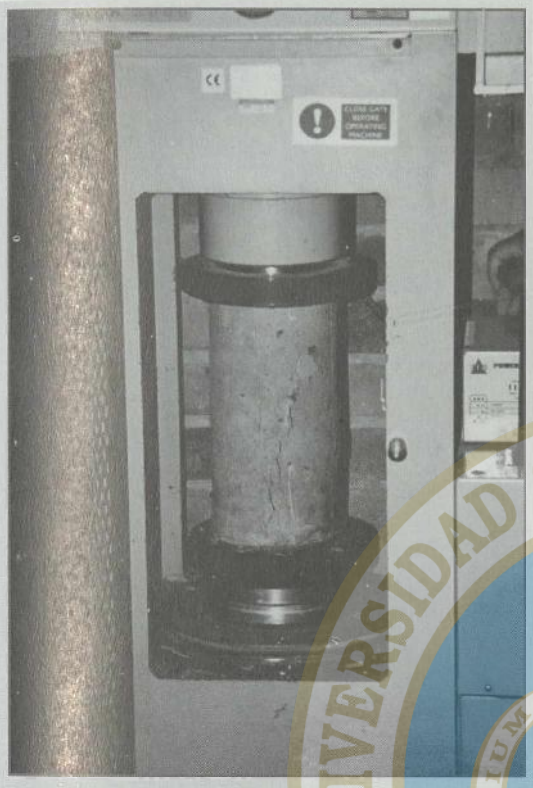


Figura 8.2. Ensayo de compresión de concreto

Resistencia a la flexión

Los elementos sometidos a flexión tienen una zona sometida a compresión y otra región en que predominan los esfuerzos de tracción. Este factor es importante en estructuras de concreto simple, como las losas de pavimentos.

Resistencia a cortante

La resistencia del concreto a esfuerzos cortantes es baja, sin embargo, generalmente es tenida en cuenta por los códigos de diseño estructural. Este tipo de esfuerzos es importante en el diseño de vigas y zapatas, en donde se presentan en valores superiores a la resistencia del concreto.

Elaboración y curado de muestras

La calidad del concreto endurecido se evalúa sobre muestras tomadas, en campo, antes de la colocación del mismo en las formaletas, o en laboratorio. Dichas muestras se someten a condiciones especiales de curado y se ensayan a determinadas edades.

Los procedimientos para la elaboración, curado de especímenes cilíndricos y prismáticos de concreto, se encuentran en las normas NTC 550, NTC 1377, ASTM C31 y ASTM C192, para muestras tomadas en obra y en laboratorio, respectivamente.

En los casos en que las muestras representan el concreto de una sección fundida, se deben tomar de acuerdo con la normas NTC 454 (ASTM C172), llevando un registro de la localización del concreto que representa y la fecha de vaciado.

El curado de las muestras tomadas en campo o elaboradas en laboratorio se realiza almacenando los especímenes durante las primeras 24 horas y protegiéndolas contra los rayos del sol o de dispositivos que irradien calor. En el caso de muestras tomadas en obra, los ejemplares son sumergidos en agua saturada de cal hasta el momento del transporte. En el laboratorio los especímenes son colocados en agua saturada con cal, o en cámaras húmedas, de acuerdo con lo especificado en la norma NTC 3512. (Figura 8.5).

Con el objeto de determinar la edad de remoción de formaletas o de puesta en servicio de una obra, los especímenes de concreto se pueden curar en campo, bajo las mismas condiciones de protección, temperatura y humedad que la estructura, ubicándolos lo más cerca posible a ella.

Ensayo de resistencia a la compresión

La medida de la resistencia a la compresión se efectúa por medio de ensayos normalizados. Se utilizan los procedimientos de las Normas NTC 550, NTC 673, ASTM C39 y ASTM C31 en donde se describen los métodos de elaboración y ensayo de los especímenes.

La resistencia a la compresión se mide con una prensa, que aplica carga sobre la superficie superior del cilindro a una velocidad especificada mientras 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.

$$f_c = \frac{P_{max}}{\text{Área}}$$

Se toma como base la resistencia máxima a la compresión a los 28 días, el aumento promedio de la resistencia con el tiempo es aproximadamente la que se indica gráficamente en la Figura 8.3, en el caso de los concretos preparados con cemento tipo I colombiano.

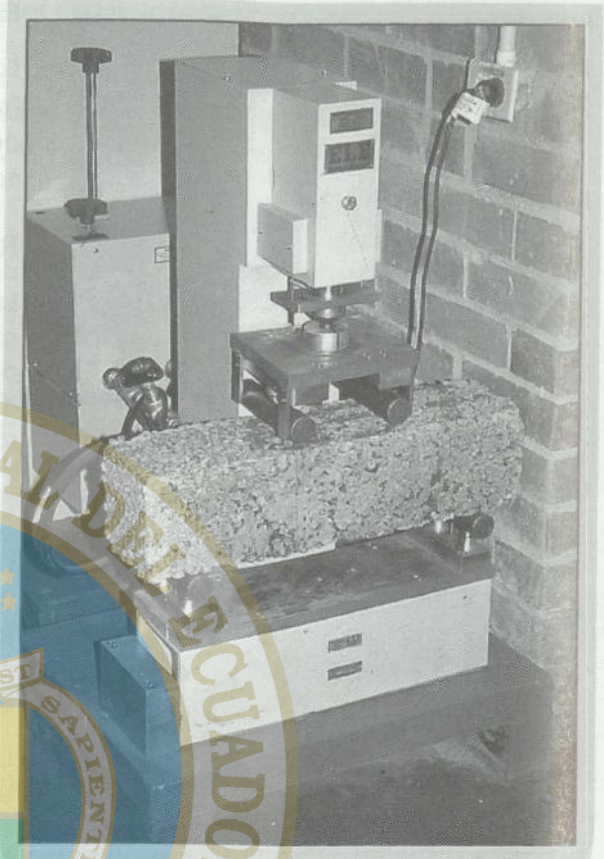


Figura 8.3. Ensayo de flexión

Aunque en el sistema internacional de unidades, la unidad de esfuerzo es el Pascal, en nuestro medio es normal expresar el resultado en kg/cm² o psi. Los valores de resistencia de los concretos más utilizados varían en un rango comprendido entre 14 y 42 MPa (142 y 428 kgf/cm²), siendo comúnmente estipulado para estructuras de concreto en general, 21 y 28 MPa (214 y 285 kgf/cm²).

La medida de la resistencia a la compresión del concreto no sólo se puede medir por medio de cilindros, sino que existe otro tipo de ensayos en los que se utilizan muestras cúbicas o prismáticas. Dichos ensayos son muy utilizados en los países europeos y casi no se conocen en nuestro medio.

La influencia de la forma y las dimensiones de los especímenes en los resultados de los ensayos a compresión es muy relativa. Como se mencionó anteriormente, el método más utilizado es el de cilindros, aunque, diversas razones pueden provocar que los ensayos se realicen sobre muestras cúbicas o prismáticas.

Los resultados de las muestras cúbicas tienen el inconveniente que están afectados por el rozamiento de los platos de la máquina, de tal manera que los datos reportados no corresponden a resistencia a la compresión simple. Por otro lado, los resultados sobre prismas o cilindros con esbeltez de 2, tienen la ventaja de que la zona central no está prácticamente afectada por la fricción ejercida por los platos.

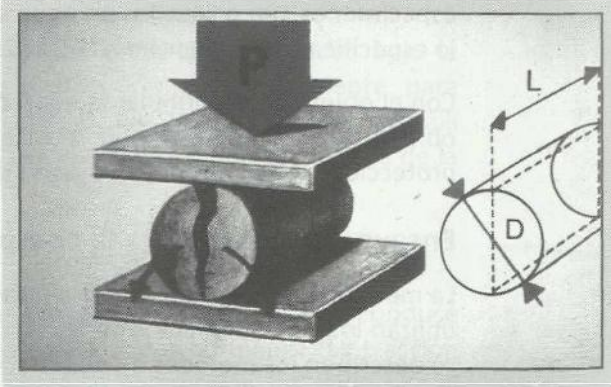


Figura 8.4. Ensayo de tensión

Si se elaboran probetas de diferente geometría (cilíndricas, cúbicas, prismáticas, etc.), con la misma mezcla y se someten a ensayo de compresión, los resultados son diferentes. Sin embargo, la diferencia obtenida se puede relacionar por medio de factores

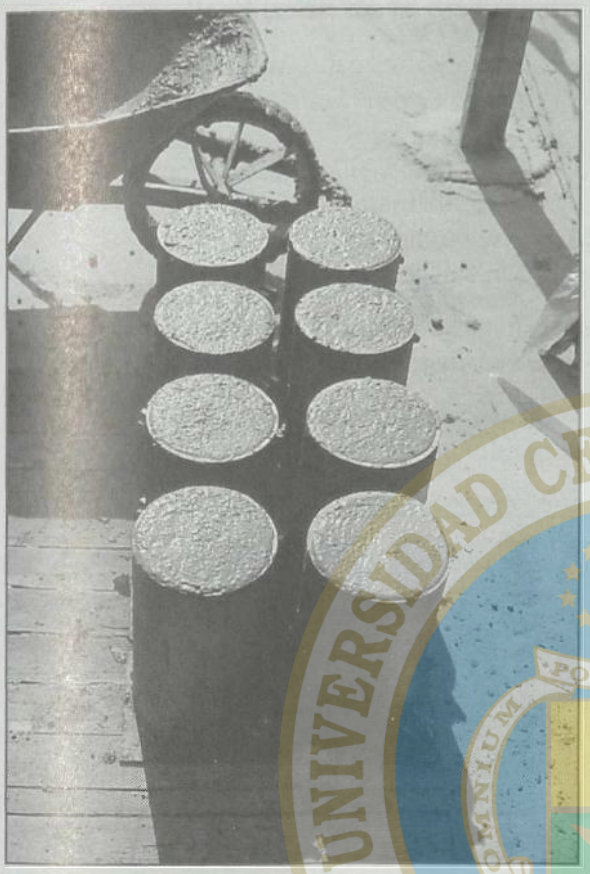


Figura 8.5. Elaboración de cilindros de concreto

de corrección entre la resistencia del cilindro y la muestra a comparar, tal como se indica en la siguiente ecuación:

$$Rc = K \times R$$

Donde:

Rc	=	Resistencia del cilindro
R	=	Resistencia del espécimen a comparar
K	=	Factor de corrección

El valor del factor de corrección (K), depende de muchas variables por lo que se recomienda determinarlo mediante ensayos comparativos. Pero, cuando se trata de cilindros de dimensiones diferentes a la de 15 x 30 cm, las normas NTC 673, NTC 3658, ASTM C39 y ASTM C42 recomiendan los mismos factores de corrección para los cilindros elaborados en moldes y núcleos extraídos de estructuras. Dichos valores son mostrados en la Tabla 8.1 y están en función de la esbeltez, que es la relación altura (h) / diámetro (D).

La falla de los cilindros de concreto con relación de esbeltez de 2, generalmente se presenta según planos inclinados respecto a la dirección de carga, porque la fricción que se genera entre el espécimen y los platos de carga restringe los movimientos laterales. La forma usual de falla es en cono, sin embargo, algunas veces el error se produce en las formas que aparecen en la figura 8.7.

Alrededor del ensayo de compresión existen algunas variables para tener en cuenta a la hora de tomar decisiones:

- Existen efectos adversos sobre cilindros almacenados en un campo a altas temperaturas, que generalmente presentan resistencias a la compresión a 7 días por encima del nivel esperado, pero el incremento en resistencia a partir de los 7 días es muy bajo, de tal manera que los resultados a 28 días en algunos casos no cumplen con los criterios de aceptación.
- Cuando no hay un curado húmedo a edades tempranas, la resistencia a edades posteriores es baja, y el desarrollo de la misma es muy lento, además no es posible obtener mayor resistencia aplicando un curado a destiempo.

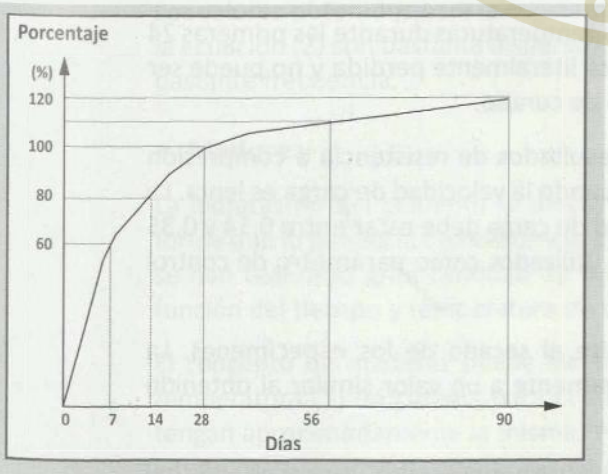


Figura 8.6. Curva de resistencia a la compresión en función del tiempo

Tabla 8.1. Factores de corrección recomendados por las normas NTC 673, NTC 3658, ASTM C39 y ASTM C42

Esbeltez h/D	Factor de corrección
2,00	1,00
1,75	0,98
1,50	0,96
1,25	0,93
1,00	0,87

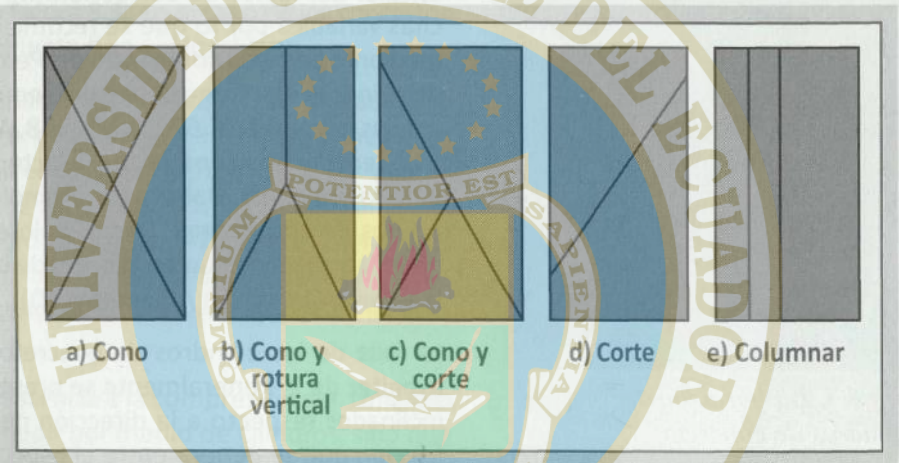


Figura 8.7. Tipos de falla de los cilindros de concreto.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST
FUNDADA EN 1620
QUITO

- Si los cilindros curados en campo son expuestos a altas temperaturas durante las primeras 24 horas, cerca del 10 % de la resistencia a los 28 días está literalmente perdida y no puede ser recuperada después, mediante ningún procedimiento de curado.
- La aplicación de carga a velocidades altas produce resultados de resistencia a compresión mayores a los obtenidos sobre las mismas muestras cuando la velocidad de carga es lenta. La norma NTC 673 (ASTM C39) especifica que la velocidad de carga debe estar entre 0,14 y 0,35 MPa/s para que los resultados obtenidos puedan ser utilizados como parámetro de control de calidad.
- La resistencia a la compresión aumenta si se permite el secado de los especímenes. La inmersión en agua de probetas secas la reduce nuevamente a un valor similar al obtenido tras el curado continuamente húmedo.
- Además de las variables propias de las determinaciones experimentales, los resultados del ensayo de resistencia a compresión son afectados por: la forma, dimensiones superficies de los especímenes, velocidad de carga y tipo de máquina de ensayo.

• Predicción de la resistencia a compresión

La resistencia especificada a compresión tiene el inconveniente de tener que esperar 28 días para conocer la certeza de su magnitud. El tiempo necesario para ajustar un diseño de concreto, en algunos casos, sería inaceptable. Por otro lado, los modernos desarrollos en los procesos de construcción, tales como formaletas deslizantes, tienen una velocidad acelerada para colocar concreto, de tal manera que a edades tempranas se aplican cargas de la masa propia de la estructura y si se descubre demasiado tarde que se utilizó un concreto de resistencia inferior a la especificada, es probable que las correcciones necesarias sean bastante costosas.

Por las razones mencionadas en el párrafo anterior es conveniente calcular la resistencia probable a 28 días lo más pronto posible y de esta forma tomar las medidas pertinentes.

Existen fórmulas que relacionan la resistencia a los 7 días con la resistencia probable a los 28 días, como las que a continuación se enumeran:

$$R_{28} = R_7 + K \times (R_7)^{0.5} \text{ (Fórmula de Slater)} \quad (1)$$

$$R_{28} = a + b \times R_7 \quad (2)$$

Donde:

R = Resistencia a compresión probable a 28 días
R_7 = Resistencia a compresión a los 7 días
K = Constante que depende principalmente de las propiedades del cemento empleado
a y b = Constantes que dependen de las propiedades del cemento, la relación agua/cemento, la temperatura, la humedad y los aditivos

Los valores obtenidos para la constante K de la ecuación (1), así como, los de los valores a y b de la ecuación (2) son bastante dispersos, sin embargo, por ser estimaciones sencillas se utilizan con bastante frecuencia.

• Madurez

La hidratación del cemento se afecta bastante por el tiempo y temperatura de curado, de tal forma que la ganancia de resistencia del concreto depende de estos dos factores. Por esta razón, se han realizado gran cantidad de investigaciones con el objeto de predecir la resistencia en función del tiempo y temperatura de curado.

El concepto de madurez puede ser definido como una función del producto del tiempo (t) y temperatura (T) de curado, para el cual todas las mezclas de concreto con la misma madurez, tengan aproximadamente la misma resistencia, independientemente de la combinación tiempo y temperatura conducentes al mismo valor de madurez.

Para aplicar este concepto es necesario, primero establecer un punto de referencia para medir la temperatura, por lo general se usa el valor -10 °C, porque a esta

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR SIB - UCE

temperatura el concreto no mostrará ningún incremento de resistencia con el tiempo. La función que probablemente mejor se correlaciona con la resistencia del concreto es la expresión de Nurse-Saul:

$$M = t\,x\,(T + 10)$$

Donde:

M = Madurez, (°C x día)
t = Tiempo de curado, (días)
T = Temperatura, (°C)

Desafortunadamente hay un número de limitaciones para usar la madurez como medio para predecir la resistencia del concreto:

- En su cálculo no se tiene en cuenta el efecto de las condiciones de humedad durante el curado.
- Su concepto no puede ser aplicado al concreto masivo, porque, la velocidad de pérdida de calor de dichas estructuras es mucho menor que las muestras normales. En el cálculo de la madurez solamente se considera la temperatura ambiente y la contribución del calor de hidratación es ignorada.
- Esta función no puede ser usada para conocer el comportamiento del concreto en estado fresco o durante el fraguado, porque el tiempo de la fórmula debe ser medido después de que el concreto adquiere resistencia y no en el tiempo de mezcla o colocación.
- Su aplicación no es apropiada si hay grandes variaciones de temperatura durante el período de curado. Como ya se dijo, una temperatura alta al principio del curado podría disminuir la resistencia del concreto, en relación con un curado a temperatura normal todo el tiempo. Por otro lado, una temperatura inicial baja podría incrementar la resistencia.

El concepto de madurez no es ampliamente empleado, probablemente por los factores mencionados, no obstante, conociendo las limitaciones inherentes puede ser usado con buenos resultados cuando se trata de establecer la resistencia del concreto en una estructura en algún tiempo previsto.

- **Ensayos acelerados de resistencia a compresión**

Como la aplicación de las fórmulas que relacionan la resistencia a la compresión a los 7 y 28 días no es muy segura, y toman tiempo se han ideado maneras para predecir la resistencia potencial a 28 días realizados pocas horas después de mezclado. Estos métodos aceleran la adquisición de resistencia de muestras de concreto, debido a que someten las muestras a temperaturas elevadas durante un período corto de curado.

La norma NTC 1513 (ASTM C684) describe el procedimiento que debe seguir para la ejecución del ensayo. En dicha norma se presentan métodos de curado acelerado con agua tibia (35 ± 3 °C), con agua hirviendo y curado autógeno. Básicamente el ensayo consiste en tomar las muestras en cilindros con tapa de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura y someterlas a uno de los procesos de curado mencionados, para luego efectuar el ensayo a compresión. Para poder ser utilizado como criterio de aceptación del concreto estructural se debe disponer de datos correlacionados con la resistencia a compresión a los 28 días.

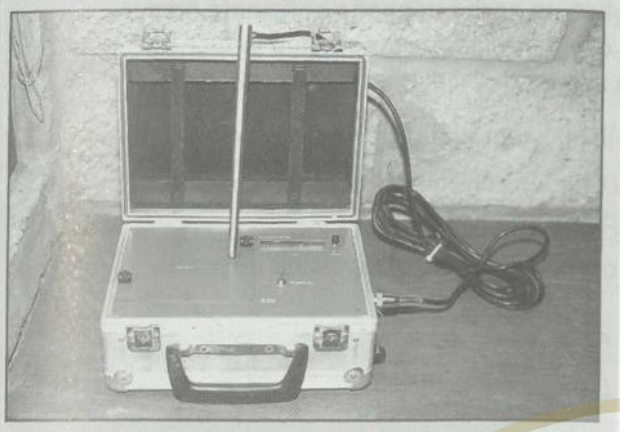


Figura 8.8. Madurómetro de concreto

- **Módulo de elasticidad y relación de Poisson**

Se determina de acuerdo con la norma NTC 4025 (ASTM C469), sobre cilindros elaborados de la misma manera que los que se ensayan a compresión, a los cuales se les adapta un dispositivo en forma de corona que tiene un deformímetro vertical (esto para hallar el módulo de elasticidad) y otro horizontal (para determinar la relación de Poisson). La velocidad de carga es la misma que se utiliza en el ensayo de compresión, y para no dañar el dispositivo por un exceso de deformación, sólo se debe aplicar carga hasta cuando la deformación longitudinal, definida como la deformación vertical dividida sobre la luz del deformímetro, sea de 50 millones, o hasta el 40% de la resistencia a compresión.

La figura 8.9 muestra un diagrama esfuerzo-deformación típico para un espécimen de concreto cargado y descargado en la cual se aprecia el módulo elástico tangente y secante.

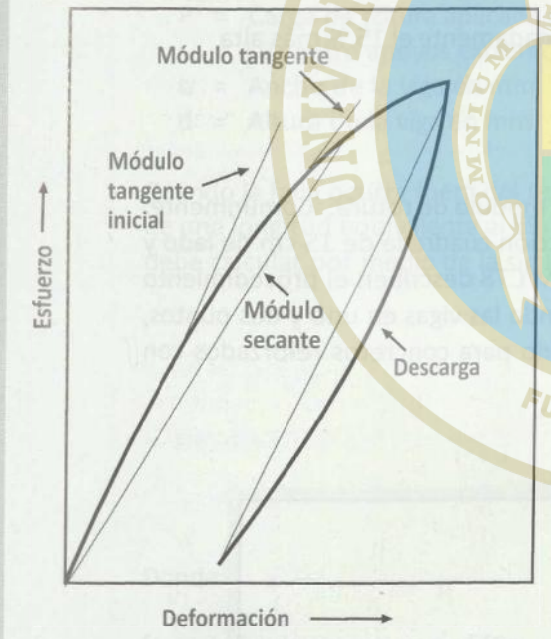


Figura 8.9. Curva característica esfuerzo-deformación para el concreto

El módulo elástico secante corresponde al rango durante el cual existe una relación más o menos constante entre la deformación y el esfuerzo. Como no es posible determinar cuándo el comportamiento de un concreto deja de ser elástico para convertirse en plástico, no hay normas que permitan determinar el módulo secante. Por lo tanto, este se debe determinar con base en la suposición que el comportamiento del concreto deja de ser elástico para determinado porcentaje de la resistencia a la compresión, dicho porcentaje se debe informar en el reporte de ensayos y normalmente está entre el 15% y el 50%.

El módulo tangente más importante es el inicial y a pesar de que es difícil determinarlo, se puede obtener su valor aproximado ya que la secante de la curva esfuerzo - deformación casi siempre es paralela a la tangente inicial de la curva durante la carga. (Figura 8.9).

Ensayo de resistencia a la tracción

Como es difícil de medir por medio de ensayos directos debido a la dificultad de montar las muestras y las dudas que existen sobre los esfuerzos secundarios inducidos por los implementos que las sujetan, en Brasil se desarrolló un método denominado tracción indirecta.

El ensayo, detallado en la norma NTC 722 (ASTM 496), consiste en cargar a compresión un cilindro convencional de 15 x 30 cm a lo largo de dos líneas axiales diametralmente opuestas a través de listones de apoyo de 3 mm de espesor, 25 mm de ancho y de longitud igual a la

del cilindro. Las láminas de apoyo distribuyen la carga sobre un ancho pequeño suficiente para evitar concentraciones de carga indebidas, de tal manera que la fuerza de compresión induce un esfuerzo de tracción transversal prácticamente constante a lo largo del diámetro vertical.

Si la resistencia a la compresión es por lo menos tres veces la resistencia a la tracción,

como normalmente sucede en el concreto, se produce la falla en sen-tido vertical en la sección transversal y la resistencia a la tracción se calcula por medio de la fórmula:

$$f_{ct} = \frac{2P}{Ld}$$

Donde:

f_{ct} = Resistencia a la tracción indirecta en MPa
P = Carga máxima aplicada en N
L = Longitud del cilindro en mm
d = Diámetro en mm

La resistencia a la tracción calculada de esta manera es aproximadamente el 15 % más alta que la determinada por pruebas de tracción directa.

Ensayo de resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión del concreto se refiere a menudo al módulo de rotura. Comúnmente, se evalúa por medio de ensayos de flexión sobre vigas de sección cuadrada de 15 cm de lado y 50 cm de longitud. Las normas ASTM C 293, NTC 2871 y ASTM C78 describen el procedimiento para realizar el ensayo sobre concretos convencionales cargando las vigas en uno y dos puntos, respectivamente y la norma ASTM C 1018 describe el método para concretos reforzados con fibras.

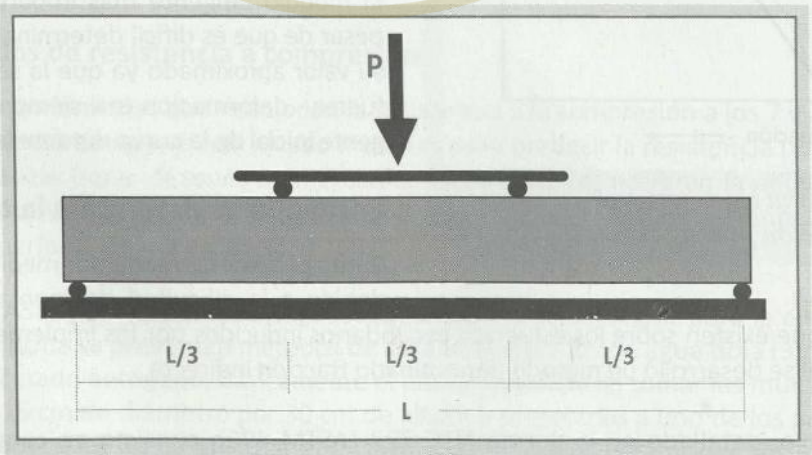


Figura 8.10. Ensayo de flexión con carga en dos puntos.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST
FUNDADA EN 1620
QUITO

El ensayo cargando la viga en dos puntos consiste en apoyar la viga a 2,5 cm como mínimo de sus extremos dejando una luz intermedia de 45 cm, en la que se carga en dos puntos situados a 15 cm de los apoyos, tal como se aprecia en la figura 8.10.

Con el objeto de asegurar una condición uniforme de humedad, las vigas se deben sumergir 20 horas antes del ensayo en agua saturada con cal a una temperatura de 23 °C.

La resistencia a la flexión o módulo de rotura se calcula mediante la siguiente fórmula siempre y cuando la falla ocurra dentro del tercio medio de la luz libre de la vigueta.

$$f_r = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde:

f_r = Módulo de rotura en MPa
P = Carga de rotura aplicada en N
L = Luz entre apoyos extremos en mm
b = Ancho de la viga en mm
d = Altura de la viga en mm

Cuando la falla ocurre fuera del tercio medio de la vigueta, pero no está separada de él por más de una longitud equivalente al 5% de la luz libre, la resistencia a la flexión o módulo de rotura se debe calcular por medio de la siguiente expresión:

$$f_r = \frac{3P(a)}{bd^2}$$

Donde:

f_r = Módulo de rotura en MPa
P = Carga de rotura aplicada en N
L = Luz entre apoyos extremos en mm
b = Ancho de la viga en mm
d = Altura de la viga en cm
a = Distancia entre la línea de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo del eje longitudinal de la cara interior de la viga, en cm

Por el contrario, si la distancia es mayor que 5%, el ensayo se debe repetir.

En algunas ocasiones, la carga (P) se aplica en el punto medio de la luz (figura 8.6). En tales casos el cálculo de la resistencia a la flexión se hace con la siguiente ecuación:

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1620 QUITO

$$f_r = \frac{3PL}{2bd^2}$$

Generalmente, el valor del módulo de rotura varía en un rango comprendido entre el 11 y 23% de la resistencia a la compresión. Vale la pena mencionar que el uso de agregados de textura rugosa y/o de forma angular, incrementa dicha resistencia por lo que se recomiendan este tipo de partículas cuando sea importante este factor. Sin embargo, cuando no se dispongan de ensayos a flexión, se puede utilizar la relación que se enumera a continuación, la cual proporciona valores aproximados.

$$f_r = K\sqrt{f'_c}$$

Donde:

f'_c = Valor de la resistencia a la compresión en MPa
K = Constante que varía entre 2,0 y 2,7
El ACI recomienda usar K = 2,0
f_r = Valor de la resistencia a la flexión

Ensayo de resistencia al esfuerzo cortante

Hasta este momento no se ha ideado ningún método para medir directamente la resistencia al esfuerzo cortante (o por cizalladura). Se ha tratado de medir sobre vigas muy cortas, con cargas muy cercanas a los apoyos, sin embargo, estas pruebas no son muy confiables, porque los resultados que se encuentran discrepan en las diferentes investigaciones, especialmente porque durante la realización del ensayo aparecen esfuerzos a compresión y tracción. No existe un consenso claro en cuanto a la relación que existe entre la resistencia al corte calculada directamente y la resistencia a compresión. Algunas investigaciones concluyen que la resistencia a cortante es aproximadamente el 12% de la resistencia a la compresión, mientras que otros sostienen que varía entre el 50% y el 90%.

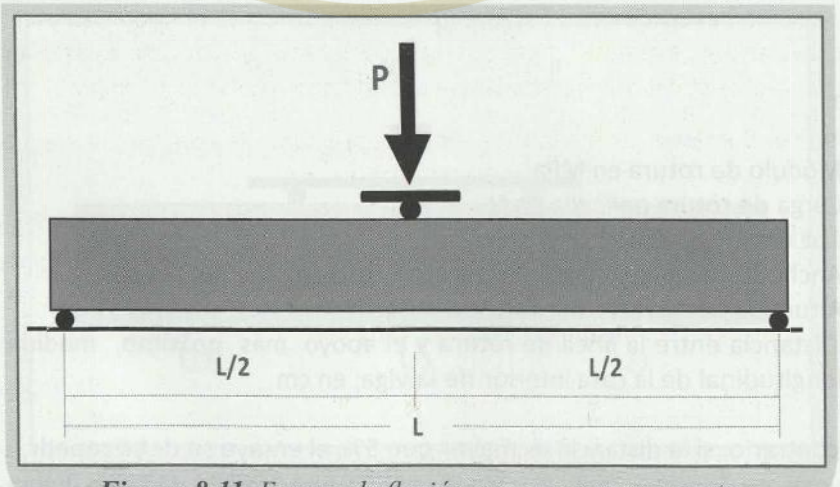


Figura 8.11. *Ensayo de flexión con carga en un punto.*

Masa unitaria

La masa unitaria del concreto endurecido es igual a la masa del concreto recién mezclado, menos el agua evaporable. El líquido que permanece en el concreto es el que se combina químicamente con el cemento y el que bajo condiciones normales no se evapora, permaneciendo retenida herméticamente en los poros y capilares. La cantidad de agua evaporable a una humedad relativa del 50%, es del orden del 2,5% de la masa del concreto y depende del contenido inicial de agua, de las características de absorción de los agregados y del tamaño de la estructura.

Clasificación del concreto según su masa unitaria

El concreto convencional es elaborado con base en agregados de masa unitaria normal, sin embargo a nivel mundial se han desarrollado y utilizado concretos hechos con agregados livianos o pesados. Como ya se dijo, la masa unitaria del concreto depende en gran parte de la masa unitaria de los agregados, por lo cual existen este tipo de materiales con un amplio rango de variación de masa. La clasificación del concreto según su masa unitaria se presenta en la tabla 8.2.

Tabla 8.2. Clasificación del concreto según la masa unitaria

Masa unitaria (kg/m³)	Descripción
500 - 2000	Concreto ligero
2000 - 2500	Concreto normal (convencional)
2600 - 5600	Concreto pesado

La masa unitaria del concreto endurecido se puede determinar mediante métodos nucleares, tales como los descritos en la norma ASTM C 1040, basados en transmisión directa e indirecta de rayos gama.

- **Durabilidad del concreto**

De acuerdo con el comité 116 del ACI, esta característica es la habilidad para resistir la acción del medio ambiente, los ataques químicos, la abrasión y otras condiciones de servicio, de tal manera que sus características y propiedades se mantengan a lo largo de su vida útil.

La durabilidad es una propiedad tan importante como la resistencia misma, y por ello merece que se le considere también con especial interés.

Aunque el concreto es un material muy durable, se puede deteriorar y llegar a la falla por un sinnúmero de factores que lo pueden afectar; de allí que para el diseño de una estructura se deba conocer muy bien el medio ambiente y las características a las que estará expuesta para de esta manera tomar las precauciones pertinentes.

- **Permeabilidad**

La propiedad cuantificable a la que con mayor frecuencia se asocia con la durabilidad es la permeabilidad, definida como la capacidad de permitir el paso de un fluido (líquido o gas) a través del concreto.

El concreto es inherentemente poroso, debido principalmente a la formación de canales capilares como consecuencia de la evaporación de agua durante el proceso de fraguado, a la permeabilidad del agregado y a la reducción gradual de volumen de la pasta cuando ocurre la reacción química entre el agua y el cemento.

Su permeabilidad puede ser medida, determinando la velocidad de flujo de agua a través de una losa de concreto. El paso de líquido a través de éste, es controlado por la ley de Darcy para medios porosos, la cual se presenta a continuación:

$$V = K_p (h/x)$$

Donde:

V = Velocidad del flujo de agua
h = Cabeza de agua (Presión hidráulica)
x = Espesor del espécimen
K_p = Coeficiente de permeabilidad

K_p es función de la relación a/c y la edad de la pasta, tal como se aprecia en la tabla 8.3.

En los lugares con estaciones, la permeabilidad causa efectos adversos sobre la durabilidad del concreto, debido a que la saturación por agua produce deterioro y descascaramiento, a consecuencia del los procesos de congelamiento y deshielo.

Para el caso de los países tropicales, en que no se presentan ciclos de congelamiento y deshielo, el efecto principal de la permeabilidad es el deterioro del concreto como producto del ingreso de agentes agresivos, tales como soluciones ácidas o sulfatos. Además en el caso de concreto reforzado, el acceso de la humedad y del aire tiene como resultado la corrosión del acero embebido, con un consecuente aumento en el volumen del mismo, lo que puede dar origen a grietas y descascaramientos del concreto.

Tabla 8.3. *Efecto de la pasta de cemento sobre el coeficiente de permeabilidad (a/c=0.51)*

EDAD (días)	K_p (m/s)	
Pasta fresca	10^{-5}	Independiente de a/c
1	10^{-8}	
3	10^{-9}	
7	10^{-11}	Poros capilares
14	10^{-12}	Interconectados
28	10^{-13}	
100	10^{-16}	Poros capilares
240*	10^{-18}	Discontinuos

* Máxima hidratación

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1620
QUITO

Es importante en estructuras que retienen líquidos, especialmente si son agresivos, o estructuras que deben permanecer estancas debajo del nivel freático del terreno, disminuir al máximo la permeabilidad, para que no circule líquido a través del concreto, el cual facilita la entrada de agentes que atacan al concreto y causan «lixiviación» o lavado de los componentes.

El grado de permeabilidad es afectado por la diferencia de presiones entre un lado y otro del elemento, el espesor del material, la naturaleza del fluido y el tiempo durante el cual se presentan dichas condiciones.

La permeabilidad depende de la porosidad de la pasta y de los agregados, del grado de compactación y de los capilares producidos por el agua de exudación. La durabilidad se puede incrementar mejorando las condiciones de permeabilidad siguiendo las siguientes recomendaciones:

- Utilizar relaciones agua/cemento lo más bajas posibles, compatibles con una adecuada manejabilidad del concreto.
- Someter el concreto a un buen curado de manera que la hidratación continua del cemento haga que el tamaño de los vacíos se reduzca. El concreto curado sin interrupción es menos permeable, no sólo por la no presencia de fisuras, sino también porque al evitar la evaporación temprana del agua de exudación, se previene la formación de redes capilares que permitan la libre circulación de agua y por ende de las sustancias agresivas tales como los sulfatos y las soluciones ácidas.
- Usar cemento con alto grado de finura.
- Emplear agregados bien gradados, de tal forma que se obtengan concretos más densos y por lo tanto menos porosos.
- Adicionar aditivos tales como las puzolanas, inclusores de aire, y como es obvio, aditivos para reducir la permeabilidad.
- Efectuar tratamientos de superficie, especialmente cuando el concreto está sujeto a la presión del agua. Dichos tratamientos pueden ser: membranas adheridas al concreto con asfalto caliente, emulsiones asfálticas, estuco de cemento adecuadamente curado, parafina (compuestos de silicona, disueltos en solventes volátiles), y llenantes inertes en un vehículo de resina. De los anteriores, los dos primeros son los más usados cuando el color negro no es objetable, mientras que los otros se emplean cuando se debe guardar buena apariencia.

Además de disminuir la permeabilidad de las estructuras de concreto es importante tener en cuenta otros aspectos complementarios para incrementar la durabilidad, tales como el empleo de mínimo contenido de cemento y uso de materiales apropiados (especialmente el tipo de cemento).

- **Influencia del medio ambiente sobre la durabilidad**

Es claro que la durabilidad de un elemento en concreto depende de las propiedades del mismo y las prácticas de colocación, pero también es función de las condiciones que lo rodean y por esto es importante estudiar muy bien el medio ambiente y las características de servicio a las que estará sometido, para utilizar una mezcla económica de excelente comportamiento.

Las condiciones medioambientales que afectan la durabilidad del concreto pueden ser de origen químico o físico, tal como las que se presentan en la tabla 8.4.

Generalmente, estos factores no se presentan de manera individual, sino que lo hacen en combinación y se manifiestan por la aparición de manchas, eflorescencias o fisuras. Es importante identificar todas las causas potenciales de deterioro antes de definir las características de la mezcla de concreto o las medidas de protección que se deben tomar.

Ataque químico

- **Ataque por ácidos:**

Si se revisan los diferentes tipos de cemento se puede apreciar que ninguno tiene la propiedad de resistir los ácidos, lo que hace suponer que el concreto es relativamente débil al ataque de estos compuestos químicos.

La fuente más común de ataque por ácido al concreto se da especialmente en climas muy calientes, en los alcantarillados por acción de las bacterias aeróbicas y anaeróbicas, las cuales en ese ambiente de aguas negras generan gas de hidrógeno sulfuroso que se disuelve en el agua, condensada sobre las paredes de conductos y cámaras sobre el nivel de agua residual. Así mismo, los ácidos inorgánicos están presentes en la atmósfera (lluvia ácida) y los ácidos orgánicos están en las aguas superficiales y freáticas procedentes de las industrias manufactureras, ensilajes agrícolas, productos de fermentación, productos de pulpa de madera o caña de azúcar, destilerías, etc.

Los morteros y concretos en servicio, expuestos a ácidos, resultan afectados debido a que las soluciones ácidas reaccionan, en primer lugar con hidróxido de calcio y luego con hidrosilicatos e hidroaluminatos de calcio del cemento endurecido para formar sales de calcio. En ambientes agresivos en donde el ácido no es reemplazado, el ataque está esencialmente confinado a la superficie expuesta, en la cual este es neutralizado por la alcalinidad del concreto y la reacción se detiene. Si es continuamente reemplazado, el deterioro del concreto es mayor, puesto que las sales solubles en agua son arrastradas y se facilita el proceso de lixiviación de las capas internas.

El cemento endurecido, completamente deteriorado por los ataques ácidos, se descompone en productos que en parte son disueltos y en parte permanecen en el sitio de la reacción como una masa no cohesionada o capa protectora que disminuye la penetración de la sustancia agresiva. Si esta capa se destruye mecánicamente, el concreto se remueve con una tasa acelerada, y si se produce una alteración en dicha capa en intervalos relativamente largos se puede causar un efecto mucho más dañino que un incremento en la concentración del ácido agresivo.

Las sales de calcio se precipitan, así sea poca la cantidad de ácido que entra en contacto con la superficie del concreto. Este fenómeno puede ser aprovechado para aumentar la durabilidad del concreto sometiéndolo a la acción de pequeñas cantidades de ácido productor de sales insolubles, las cuales taponan los poros superficiales e impiden la entrada de nuevos agentes agresivos.

Además del deterioro del concreto, cuando este es muy permeable, los ácidos pueden llegar hasta el acero de refuerzo y ocasionar su corrosión, con consecuencias lamentables para la estructura.

La resistencia al ataque de los ácidos se puede mejorar si se deja secar el concreto antes de que quede expuesto, ya que se forma una capa de carbonato de calcio que bloquea los poros y reduce la permeabilidad en la parte superficial. Existen también tratamientos superficiales con

alquitrán de hulla, pinturas bituminosas, resinas epóxicas, sílicofluoruro de magnesio y otros agentes que han demostrado resultados altamente satisfactorios.

Tabla 8.4. Influencia de las condiciones medioambientales sobre los componentes del concreto (2)

Fuente	Componente más afectado en orden de importancia
Ataque químico	
Ataque por ácidos	Pasta
Ataque por sulfatos	Pasta
Reacción álcali - agregado	Agregado
Carbonatación del cemento	Pasta
Corrosión del acero	Refuerzo
Ataque físico	
Congelamiento - deshielo	Pasta, Agregados
Humedecimiento - secado	Pasta
Cambios de temperaturas	Pasta, Agregados
Abrasión	Pasta, Agregados
Fuego	Pasta

Hay que tener en cuenta que el grado de protección de los diferentes tratamientos varía, por ello es importante que la capa protectora producida por el método utilizado permanezca sin deteriorarse por agentes mecánicos, del tal forma que se hace necesario inspeccionar y renovar el recubrimiento.

- **Ataque de sulfatos:**

Los sulfatos de sodio, potasio y magnesio, presentes en los suelos y agua con álcalis, son muchas veces los responsables del deterioro de las estructuras de concreto. La causa del deterioro puede tener dos orígenes: en primer lugar, porque los sulfatos reaccionan químicamente con la cal y el aluminato de calcio hidratados en la pasta de cemento, formando sulfato de calcio y sulfoaluminato de calcio respectivamente. Dichas reacciones van acompañadas de una considerable expansión, que ocasionan esfuerzos de tracción internos y que culminan con agrietamiento y rompimiento de la masa de concreto.

La segunda causa se presenta cuando el concreto está en contacto con aguas alcalinas, lo cual produce la deposición de cristales de sulfato en los poros y canales capilares como consecuencia de la evaporación. El crecimiento de los cristales tiene lugar cuando se tiene un ciclo de humedecimiento y secado que puede eventualmente llenar los poros y desarrollar presiones suficientes para la rotura del concreto.

Para prevenir el deterioro del concreto por acción de la primera causa, normalmente se utiliza el cemento tipo 2 o tipo 5, dependiendo del grado de ataque. Todos los cementos normales desarrollan completa desintegración dentro de uno o dos años, pero con los cementos de bajo contenido de C_3A, la resistencia al deterioro se prolonga a períodos mucho más largos.

La resistencia a la desintegración por el crecimiento de cristales, se logra mediante el uso de un concreto denso, de muy baja permabilidad, elaborado con una relación agua/cemento baja y preferiblemente con inclusión de aire. Adicionalmente se ha encontrado que concretos elaborados con cementos Pórtland puzolánicos poseen considerable resistencia al ataque de los sulfatos.

El contacto de soluciones ácidas y sulfatadas con el concreto se debe evitar o controlar. El mecanismo de deterioro causado por ácidos y sulfatos se produce cuando entran en reacción con el hidróxido de calcio del cemento; proceso que acelera la corrosión del acero de refuerzo.

- **Reacción álcali - agregado:**

Es una reacción química que se puede presentar entre agregados que contengan (óxidos de sílice inestables) y el cemento (hidróxidos alcalinos) y que originan expansiones dentro del concreto endurecido.

Algunos agregados conocidos que reaccionan con el álcali del cemento son: el sílice opalino, la caliza silícea y en general rocas con alto contenido de sílice. En consecuencia, cuando se requiere aprovechar una fuente de agregados cuyo comportamiento sea desconocido, es muy aconsejable hacer ensayos petrográficos y exámenes químicos, así como ensayos de expansión de morteros.

La experiencia con agregados reactivos, tanto en el campo como en el laboratorio, ha demostrado que tales materiales con combinación en el álcali del cemento no causan un daño apreciable cuando la concentración de este último no sobrepasa del 0,6%.

- **Carbonatación del cemento:**

Este fenómeno sucede cuando el hidróxido de calcio ($Ca(HO)_2$) presente en la pasta de cemento, en presencia de agua, reacciona con el dióxido de carbono (CO_2), produciendo $CaCO_3$ (Carbonato de calcio), generando así una pérdida de volumen. Esta carbonatación se presenta en la superficie del concreto y su profundidad dependerá de la porosidad de la pasta. Esta reacción conduce al descascaramiento superficial.

- **Corrosión del acero de refuerzo:**

El fenómeno de corrosión en el concreto armado se presenta por efectos electroquímicos, en presencia de oxígeno y soluciones acuosas de sales, bases, o ácidas en el concreto.

En general, la forma más común de corrosión es causada por el flujo de una corriente generada dentro del concreto, por diferencial de humedades, presencia de oxígeno o concentración de electrólitos. Así mismo, los iones de cloruro de calcio, causan corrosión del acero, produciendo expansión y aparición de esfuerzos de tracción que conllevan al agrietamiento.

Ataque físico

- **Congelamiento - Deshielo:**

Al disminuir la temperatura de un concreto saturado, el agua que se encuentra dentro de los poros aumenta de volumen por congelación produciendo expansión y fisuras en el elemento. Esta condición se vuelve crítica cuando los ciclos congelamiento - deshielo se hacen repetitivos, porque su efecto es acumulativo.

- **Humedecimiento y secado:**

En estructuras hidráulicas, una de las principales causas de deterioro es el continuo humedecimiento y secado, el cual produce expansiones y contracciones creando condiciones de agrietamiento y descascaramiento del concreto, al igual que pueden aumentar la corrosión del acero de refuerzo.

Cuando un elemento en concreto está sujeto a ciclos de humedecimiento secado, se presentan eflorescencias en la superficie del concreto, las cuales son el resultado de la percolación de agua a través del material de manera continua o intermitente. Las eflorescencias constan de un depósito de sales, que son lixiviadas del concreto y cristalizadas por la evaporación del agua y la interacción con el dióxido de carbono presente en la atmósfera. Las sales típicas son carbonatos de sodio, potasio o calcio, siendo el mayor constituyente el carbonato de calcio.

La eflorescencia es más un problema estético que de durabilidad, pero indica que está ocurriendo lixiviación dentro del concreto. Su exceso aumenta la porosidad, disminuye la resistencia e incrementa la vulnerabilidad a los químicos agresivos.

La tasa de lixiviación depende de la cantidad de sales disueltas contenidas en el agua que se percola. Las aguas blandas, tales como el agua de lluvia, son las más agresivas, mientras que las aguas duras que contienen grandes cantidades de calcio son menos peligrosas. La temperatura del agua también se debe considerar, porque el hidróxido de calcio es más soluble en agua fría que en agua caliente.

- **Abrasión:**

La abrasión se ocasiona por fluidos en movimiento que están en contacto con estructuras de concreto, creando fricción o cavitación y produciendo desgaste sobre la superficie de este. En la medida en que la resistencia a la compresión aumenta, se incrementa su resistencia a la abrasión. Esta propiedad es importante en elementos sometidos a tráfico, deslizamientos y rozamiento como son los pavimentos, pisos, túneles y estribos de puentes sujetos a la acción de corrientes de agua, vertederos, etc.

- **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 es cada vez menor a medida que aumenta el espesor de la estructura.

En el concreto armado sujeto al fuego, 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 la juntas, en las paredes de concreto mal compactadas o en los planos de las varillas de refuerzo. Sin embargo, la pérdida de resistencia comienza aproximadamente a los 330 °C y aún a los 500 °C se considera que el concreto conserva el 80% de su resistencia inicial. Una vez el refuerzo queda al descubierto, se calienta rápidamente con la consecuente pérdida de resistencia. El acero dulce pierde aproximadamente el 50% de su resistencia a 600 °C mientras que el acero pretensado sufre la misma pérdida pero a 400 °C.

La resistencia al ataque del fuego depende principalmente de tres factores, a saber: el tipo de agregados y contenido de humedad, el tipo de cemento y el espesor del elemento de concreto.

Los agregados de mejor resistencia al ataque del fuego son los livianos. Esto se debe a que la mayoría de partículas de agregado ligero son manufacturadas por un proceso que involucra altas temperaturas. De los agregados naturales se destacan los calcáreos, tal es el caso de las calizas.

El contenido de humedad del concreto también influye en la velocidad de descascaramiento. Algunos análisis de estructuras expuestas al fuego, muestran que a mayor contenido de humedad del elemento se produce más rápido el descascaramiento.

Es posible la elaboración de concretos refractarios. Esto se logra con el uso de un cemento especial con alto contenido de alúmina, el cual produce concretos con una alta resistencia al fuego pero con el problema de que no puede utilizarse para fines estructurales.

La norma ASTM E 119 establece un método de ensayo para medir la resistencia al fuego del concreto.

Un concreto sujeto a cualquiera de las exposiciones anteriormente mencionadas se ve afectado por la remoción del mortero; por lo tanto, una reducción en el contenido de arena mejora la durabilidad. De otra parte, con el uso de agregados resistentes y de tamaño bastante grande, la utilización de recubrimiento, de buen curado y una baja relación agua/cemento, se obtienen concretos de buen desempeño cuando son atacados por agentes agresivos.

Estos factores conducen a un incremento de la resistencia a la compresión pero, cuando las condiciones exigen el empleo de un inclusor de aire esta propiedad se puede disminuir. Por este motivo el contenido de aire se debe guardar en un mínimo requerido para durabilidad, teniendo cuidado de no excederse en más del 4%.

- **Ensayos para evaluar la durabilidad**

La protección contra la corrosión y la determinación de la actividad en el acero de refuerzo se puede ensayar siguiendo el procedimiento de la norma ASTM C876.

La reactividad álcali-agregado se puede analizar mediante la norma ASTM C227 (Reacción álcali-sílice) y C586 (Reacción álcali - carbonato). La resistencia a los sulfatos se evalúa mediante las normas ASTM C452 y C1012. La resistencia a la abrasión se puede determinar con la norma ASTM C418 (Limpieza con chorro de arena), C 779 (método de disco giratorio) y C944 (cortadora rotatoria).

Cambios de volumen

La principal causa del agrietamiento de los elementos construidos en concreto, se debe a los continuos cambios de volumen que experimenta durante su vida útil, y que se producen tanto por causas internas como externas a este. Estos cambios volumétricos que en general están restringidos pueden originar esfuerzos que superen la capacidad resistente del concreto a la tracción y producir agrietamiento.

Los cambios volumétricos en el concreto se clasifican según la fuente que los produce, en aquellos debidos a reacciones químicas, tales como la carbonatación del cemento, la corrosión del acero y la reacción álcali - agregado, y en los causados por efectos físicos, tales como, la contracción por secado y cambios de temperatura.

Los cambios de volumen ocasionados por efectos químicos disminuyen la durabilidad del concreto, tal como se discutió anteriormente.

- **Contracción por secado**

Al igual que durante el proceso de fraguado, el concreto pierde agua en su etapa de endurecimiento y esto produce cambios de volumen que originan superficies agrietadas que no parecen ser más que un problema estético. Sin embargo, pueden causar daño al concreto y armadura de la estructura, debido a que facilitan la comunicación de los poros internos del concreto con el exterior y permiten que los agentes químicos se depositen en ellas y penetren para corroerlo.

- **Contracción y dilatación por temperatura**

El concreto tiene la propiedad de dilatarse con aumentos de temperatura y contraerse cuando esta baja. Los efectos de estos cambios son semejantes a los producidos por la contracción por secado.

- **Fluencia del concreto**

Se puede definir como un aumento de deformación que se presenta bajo esfuerzos constantes (figura 8.12), el cual puede ser varias veces mayor que la deformación instantánea causada por la aplicación de carga, por lo cual es muy importante en lo que se refiere a los mecanismos estructurales.

La fluencia depende del contenido volumétrico de pasta de cemento, el contenido de agregado y ciertas propiedades del agregado, como el módulo de elasticidad y la porosidad.

La fluencia se determina sobre especímenes cilíndricos de concreto, que tienen un deformímetro eléctrico embebido, elaborado en moldes horizontales de acuerdo con la norma NTC 1377 (ASTM C192). El ensayo está descrito en la norma NTC 3707 (ASTM C512) y consiste en aplicar sobre los cilindros una carga constante menor al 40% de la resistencia a compresión a partir de los 28 días de edad y medir la deformación en diferentes intervalos de tiempo hasta completar un año.

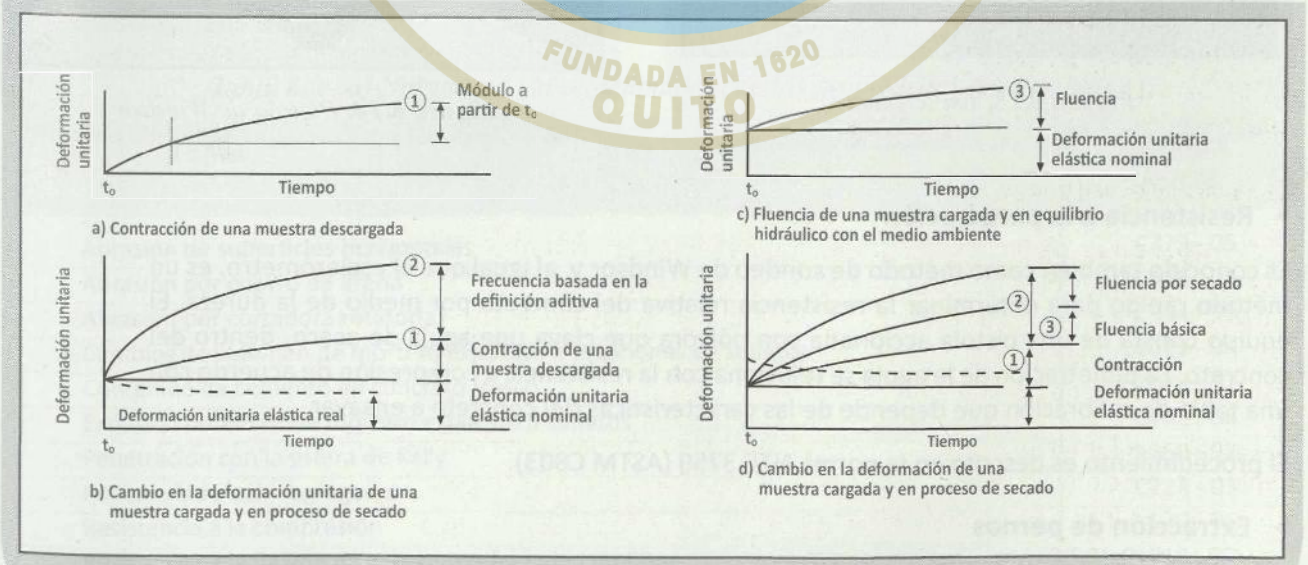


Figura 8.12 *Deformaciones del concreto sometido a carga constante (20)*

Ensayos no destructivos

Es posible utilizar varios ensayos para evaluar la resistencia relativa del concreto endurecido. Los experimentos más comunes son el del esclerómetro, penetración, arranque de pernos y técnicas dinámicas de vibración. Así mismo se están difundiendo otras prácticas basadas en principios modernos, tales como emisión de rayos X.

- **Esclerómetro**

Es conocido también como martillo de Schmidt y evalúa la dureza superficial del concreto por medio de la medición del rebote de un émbolo cargado con un resorte, después de haber golpeado una superficie plana de la estructura. La dureza superficial además de ser útil para revisar la uniformidad del concreto, es una indicación de la resistencia a compresión del concreto.

El procedimiento de ensayo está descrito en la norma NTC 3692 (ASTM C805).

Los resultados se ven afectados por la rugosidad de la superficie, el tamaño, forma y rigidez del espécimen; la dimensión máxima del agregado grueso; la edad y condición de humedad del elemento y la carbonatación de la superficie del concreto.

Figura 8.13. Esclerómetro

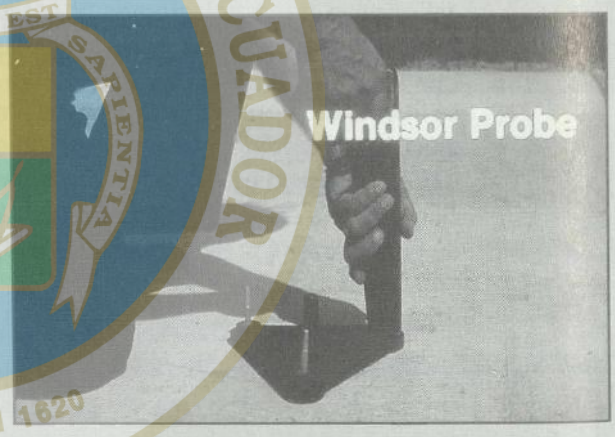


Figura 8.14. Pistola de Windsor

- **Resistencia a la penetración**

Es conocido también como método de sondeo de Windsor y, al igual que el esclerómetro, es un método rápido para determinar la resistencia relativa del concreto por medio de la dureza. El equipo consta de una pistola accionada con pólvora que clava una aguja de acero dentro del concreto. La penetración de la aguja se relaciona con la resistencia a compresión de acuerdo con una tabla de calibración que depende de las características del concreto a ensayar.

El procedimiento es descrito en la norma NTC 3759 (ASTM C803).

- **Extracción de pernos**

Este ensayo consiste en colocar un perno de acero dentro del concreto que se desea probar para posteriormente medir la fuerza necesaria para extraerlo. Esta fuerza corresponde a la resistencia a cortante del concreto, y con ella es posible estimar la resistencia a compresión.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

- **Ensayo de velocidad de pulso**

La velocidad del ultrasonido varía de acuerdo a las propiedades del sólido a través del cual viaja. Se puede medir, determinando la frecuencia resonante de un espécimen o registrando el tiempo de recorrido de pulsos a través de una muestra. Las elevadas indican que el concreto es de alta calidad, mientras que las bajas indican que es de mala calidad.

Extracción de núcleos

Cuando la resistencia de los especímenes ensayados a compresión es inferior al valor mínimo especificado f'c, es probable que el concreto de la estructura esté bajo o que los cilindros no sean representativos del concreto colocado.

Para tratar de determinar si la resistencia del concreto es baja, es posible extraer núcleos o cora-zones del elemento de resistencia sospechosa siguiendo el procedimiento descrito en la norma NTC 3650 y ensayarlos a compresión. Los factores que modifican los resultados de núcleos de con-creto son edad, diámetro, esbeltez, presencia de armadura, altura y dirección de la extracción.

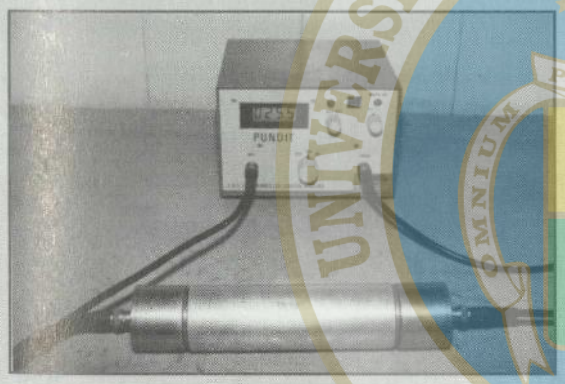


Figura 8.15. Aparato de ultrasonido

Figura 8.16. Núcleos de concreto

Tabla 8.5 - a) Normas ASTM relacionadas con las propiedades del concreto

TEMA	NORMA ASTM
Abrasión de superficies horizontales	C779 - 05
Abrasión por chorro de arena	C418 - 05
Abrasión por cortadora rotatoria	C944 - 99
Cambios de volumen de mortero expuesto a soluciones de sulfatos	C1012 - 04
Contenido de cemento en concreto fresco	C1078 - 87
Expasión potencial de mortero expuesto a sulfatos	C452 - 06
Penetración con la esfera de Kelly	C360 - 92
Reactividad álcali - agregado	C227 - 03
Resistencia a la compresión	C39 - 05
Resistencia a la flexión de concreto reforzado con fibras	C1018 - 97
Resistencia a flexión. Apoyo en un punto	C293 - 08

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Tabla 8.5-b) *Lista de los ensayos descritos en las Normas ASTM y NTC que se practican al concreto*

Tema	Norma NTC	Antecedente ASTM	Normas que deben consultarse
NORMAS GENERALES			
Concreto premezclado	3318	C94	118, 121, 174, 220, 321, 396, 454, 550, 673, 889, 1000, 1028, 1032, 1299, 1926, 3459
Morteros químicos resistentes, grouts, recubrimiento monolítico y concretos poliméricos, ensayos de compresión	491	C579	
Terminología	385	C125	32
Toma de muestras	454	C172	
Yeso para refrentado de cilindros de concreto	490	C472	
CONCRETO FRESCO			
Asentamiento	396	C143	454
Cámaras, cuartos húmedos y tanques de curado	3512		
Contenido de agua	3752	C1079	176, 454, 1926, 3318
Contenido de aire. Método de presión	1032	C231	454, 1028
Contenido de aire. Método volumétrico	1028	C173	454, 1032
Elaboración y curado en laboratorio	1377	C192	176, 237, 396, 1032
Elaboración y curado en obra	550	C31	454, 504
Exudación	1294	C232	1377
Masa unitaria y rendimiento	1926		
Temperatura del concreto fresco	3357	C1064	454
Tiempo de fraguado	890	C403	396
CONCRETO ENDURECIDO			
Densidad de métodos nucleares	3725	C1040	1926
Esclerómetro	3692	C805	
Extracción de núcleos y vigas de concreto aserradas	3658	C42	50, 673, 722, 1000, 1377
Extracción de pernos	3772	C900	
Fluencia	3707	C512	550, 1377, 504
Método de elasticidad y relación de Poisson	4025	C469	504, 550, 673, 889,1377
Penetración	3759	C803	
Predicción de las resistencias futuras a compresión	1513	C684	
Refrentado de cilindros	504	C617	121, 321, 490
Resistencia de la compresión	673	C39	504, 550
Resistencia a la flexión	2871	C78	
Tracción indirecta de cilindros	722	C496	550, 454, 673

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1826
QUITO

PROPIEDADES DEL MORTERO

Capítulo 9

Generalidades

Desde que se tiene noticia, el mortero se ha elaborado con arena más yeso o cal, por ejemplo, en Egipto durante el siglo III a.C se utilizaron morteros de yeso quemado y arena, posteriormente en Grecia y Roma se fabricaron morteros a partir de diversos materiales como cal quemada, toba volcánica y arena. Cuando aparecieron los primeros inmigrantes en Norte América, todavía se fabricaba un producto relativamente débil a partir de cal y arena. El uso común del cemento Pórtland como constituyente del mortero, comenzó a principios del siglo XX, lo cual llevó a un mortero mucho más resistente. Hoy, el mortero aún se hace con cemento Pórtland y cal hidratada, así como también, con cementos de mampostería o albañilería.

El mortero tiene una amplia gama de aplicaciones, puede ser empleado para nivelar pisos, proteger taludes, recubrir elementos estructurales, pero el mayor consumo está en la construcción de mampostería, razón por la cual la tecnología del mortero se ha enfocado principalmente en esta rama. Vale la pena señalar que un mortero de mampostería se puede utilizar satisfactoriamente para otros propósitos, como las aplicaciones señaladas y que los ensayos para hacer el control que son aplicadas a cualquier clase de mortero.

La principal función del mortero es proporcionar para siempre apoyo y adherencia a las unidades de mampostería, lo cual se logra si dentro del ensamblaje actúa como elemento integral, con unas características de comportamiento deseadas. Además de influir en las propiedades estructurales de la mampostería, el mortero tiene por objeto reducir la permeabilidad.

Es un material versátil capaz de satisfacer una variedad de requisitos. Una porción relativamente pequeña de mortero influye significativamente en el comportamiento de la mampostería. No hay una mezcla particular que satisfaga todas las situaciones. Sólo un conocimiento sobre los materiales que lo componen y sus propiedades, simple y colectivamente, permitirán seleccionar el tipo de mortero de acuerdo con un uso específico.

A causa de que algunos de los componentes principales del concreto de cemento Pórtland y de los morteros son los mismos, a menudo se asume erróneamente que la práctica de un buen concreto es también la práctica de un buen mortero. Realmente, el mortero difiere del concreto en las consistencias, en los métodos de colocación y el ambiente de curado. Este último es comúnmente usado como unión de dos unidades de mampostería dentro de un elemento estructural simple, mientras el concreto es usualmente un elemento estructural en sí mismo.

Una mayor diferencia entre estos materiales es ilustrada por la forma como ellos son manejados durante la construcción. El concreto es usualmente colocado en un molde de madera o metal no absorbente, de tal forma que la mayor cantidad de agua es retenida. El mortero es colocado entre unidades de mampostería, que son absorbentes, y tan pronto como hacen contacto comienza a perder agua. La resistencia a la compresión es de gran consideración en el concreto y en el mortero es sólo uno de los factores importantes, por esto se adiciona agua al mortero después de mezclado hasta obtener el grado adecuado de trabajabilidad, que permita una eficiente colocación y por tanto una buena adherencia.

Como es lógico, el mortero no es muy diferente al concreto en cuanto al desarrollo de sus propiedades y por tanto se deben realizar cuidadosamente las tareas de manejo, colocación y curado. Estas influencian de gran manera su desempeño, el cual a la vez depende de la cantidad de cemento y dosificación de los demás componentes.

Hoy el curado del concreto es tenido en cuenta en la mayoría de las obras, desafortunadamente no ocurre lo mismo con el mortero, y no es frecuente que se apliquen medidas que garanticen el desarrollo adecuado de sus propiedades.

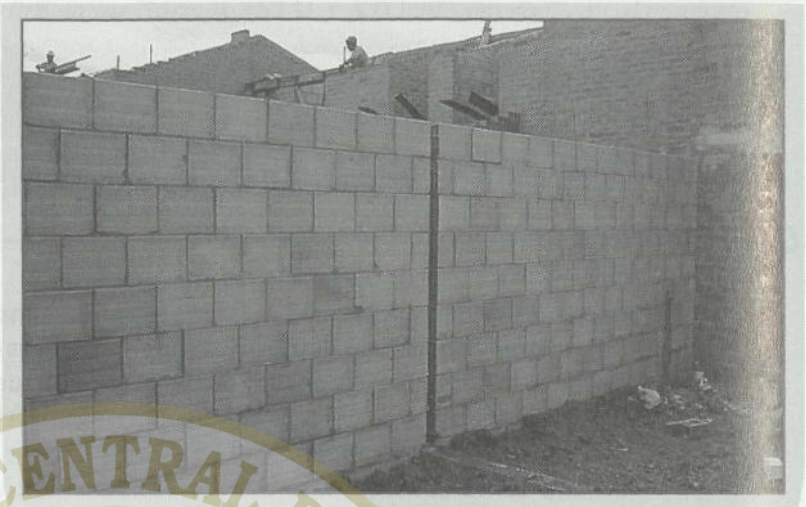


Figura 9.1. Mampostería con mortero de pega

Tipos de morteros

El mortero se puede producir empleando cemento Pórtland o cemento para mampostería, y cada uno de ellos puede ser mejorado mediante la adición de cal hidratada, la cual ayuda a mejorar muchas propiedades deseables, entre las que están la plasticidad, la retención de agua y estabilidad volumétrica. La cantidad de cal debe ser estudiada para cada mezcla particular, mucha podría producir efectos adversos, tal como la reducción en el tiempo de trabajabilidad, con la consecuente necesidad de emplear aditivos retardantes.

El cemento de mampostería está diseñado para satisfacer las necesidades de adherencia y las de retención de agua del mortero para pega y pañete en la construcción de muros. Como éste cemento está diseñado para pegar o adherir, solo se debe usar en la producción de mortero de mampostería y nunca en la elaboración de concreto.

En los párrafos siguientes se describen los diferentes tipos de mortero que se pueden producir y se mencionan las propiedades que se pueden esperar de cada uno.

Clasificación según composición

- **Morteros de cemento Pórtland**

El mortero de cemento Pórtland generalmente carece de plasticidad, tiene baja retención de agua, es más duro y menos trabajable que el mortero con cemento de mampostería o con cemento Pórtland adicionado con cal.

Los morteros de cemento Pórtland con cal hidratada, poseen una amplia gama de propiedades. Por un lado, un mortero de cemento Pórtland y arena, únicamente tiene una alta resistencia a la compresión y una baja retención de agua. Un muro construido con dicho mortero tendrá buena resistencia, pero será vulnerable al agrietamiento y a la penetración del agua. Por otro lado, un mortero con cal y arena tiene baja resistencia a la compresión y alta retención de agua, de tal forma que un muro realizado con él tendrá menor resistencia, especialmente a edades tempranas, pero tendrá mayor resistencia al agrietamiento e impermeabilidad. Entre estos dos extremos,

las diversas combinaciones de cemento y cal proporcionan un equilibrio con una amplia gama de propiedades, una alta resistencia y fraguado inicial del cemento modificados por la excelente trabajabilidad y retención de agua de la cal.

- **Mortero de cemento de mampostería**

Es un producto que generalmente contiene cemento Pórtland y finos, tales como caliza y otros materiales en diferentes proporciones, más aditivos tales como plastificantes y agentes incorporadores de aire y agentes repelentes de agua. El cemento que usualmente contiene es tipo 3. Los morteros elaborados con él, poseen en general una excelente trabajabilidad y durabilidad. La norma NTC 4027 reconoce tres tipos de cementos de mampostería. Estos cementos de mampostería han sido diseñados para que produzcan morteros con propiedades particulares.

Dichos cementos proporcionan todo el material cementante necesario al cual sólo hay que añadir arena y agua en la mezcladora. Es más fácil lograr una apariencia consistente en morteros producidos a partir de los de mampostería, ya que todos los ingredientes cementantes se proporcionan, se muelen o se mezclan conjuntamente antes de ser empacados.

En 1954 los tipos de mortero para mampostería fueron designados A1, A2, B, C y D. Sin embargo, se encontró que el tipo «A1» tenía connotación de ser el mejor y muchos diseñadores especificaban este, pensando que era el más bueno. Para acabar con este mal entendido, se asignaron nuevas letras que no hicieran pensar que un tipo de mortero era mejor que otro. La designación de las nuevas letras fue M, S, N, O y K, las cuales corresponden al deletreo cada dos letras de la palabra «MaSoN wOrK» (trabajo de mampostería).

El mortero tipo K, ya no aparece en las especificaciones porque las diferencias con el tipo O son mínimas y en las aplicaciones prácticas, este lo reemplaza. La norma NTC 3353 titulada «especificaciones para mortero de mampostería», ha dejado solamente los morteros tipo M, S, N y O. Los morteros para mampostería pueden ser especificados de acuerdo con un criterio de proporción o propiedades, pero no por una combinación de ellas.

Ningún mortero de manera individual es apropiado para todas las aplicaciones. La variación de proporciones siempre hace que se mejoren unas propiedades a expensas de otras.

Mortero tipo M

Es una mezcla de alta resistencia que ofrece mayor durabilidad que otros tipos de mortero. Se recomienda para mampostería reforzada o sin refuerzo que pueda estar sujeta a altas cargas de compresión, a acción severa de congelamiento, o presión lateral de tierra, vientos huracanados o terremotos. Al ser de durabilidad superior, los morteros tipo M pueden ser usados en estructuras enterradas, que estén en contacto con suelos, tales como fundaciones, muros de contención y alcantarillas.

Mortero tipo S

Proporciona la mayor resistencia a la adherencia. Se usa generalmente para estructuras sometidas a cargas normales de compresión, pero que requieren alta adherencia a esfuerzos de flexión. También es recomendable donde se utiliza como pega, por ejemplo en la colocación de enchapes.

Mortero tipo N

Es el mortero multipropósito para uso en las estructuras de mampostería. Es apropiado para pañete y paredes interiores de partición. Este mortero de resistencia media es el que mejor combina las propiedades de resistencia, trabajabilidad y economía. Cuando la proporción de cemento: cal: arena es 1: 1: 6 la resistencia obtenida en el laboratorio es superior a 19,6 kPa, mientras que las mezclas de cemento de mampostería y arena usualmente reportan resultados de 12,6 kPa.

Mortero tipo O

Es de alto contenido de cal y baja resistencia, para uso en pañetes y pega en paredes poco cargadas y de partición. No endurece en presencia de humedad. Es frecuentemente utilizado en trabajo de mampostería para casas de uno o dos pisos y es el preferido por los mamposteros por su excelente trabajabilidad y bajo costo.

En la tabla 9.1 se presentan las propiedades de los diferentes tipos de mortero.

Tabla 9.1. Tipos de Mortero

Mortero	Tipo	Esfuerzo promedio de compresión a los 28 días, min, Mpa	Mínima retención de agua, (%)	Máximo aire contenido (%)
Cemento - Cal	M	17,2	75	12
	S	12,4	75	12
	N	5,2	75	14
	O	2,4	75	14
Cemento de mampostería	M	17,2	75	*
	S	12,4	75	*
	N	5,2	75	*
	O	2,4	75	*

* Cuando el refuerzo estructural está embebido en un mortero de cemento de mampostería el máximo contenido de aire debe ser 18%

Existen también los morteros tipo PM y PL conocidos como morteros de relleno para mampostería (NTC 4048), de agregados finos y gruesos respectivamente. Además hay morteros especiales refractarios para chimeneas y mampostería resistente al ataque por ácidos.

En la selección del tipo de mortero, se hace necesario conocer el destino y los materiales sobre los cuales se va a aplicar, ya que se requiere una compatibilidad. Por ejemplo, de nada serviría aplicar un mortero tipo M para pegar ladrillo de cal de baja resistencia, porque la resistencia de la pega será tal que las grietas por sobrecarga aparecerán en los ladrillos y no por las juntas.

Clasificación según sistema de producción

- **Mortero mezclado en obra**

El mortero mezclado en obra, requiere hacerse en un sitio protegido del sol, el viento y la lluvia y de fácil acceso al almacenaje del cemento y arena. No es recomendable mezclar con pala, lo menos que se necesita para proporcionar homogeneidad es emplear mezcladoras mecánicas y dosificar la arena con el mismo grado de humedad.

Mortero dosificado por silos

Dentro de las nuevas tendencias para mezclar el mortero en obra, en Holanda, se han desarrollado unos silos con capacidad para almacenar la arena y el cemento necesario para producir aproximadamente 10 m^3 de mortero. Tienen un compartimiento para cada constituyente del mortero y están diseñados para ser transportados en camiones especiales. Tienen acoplado en la descarga un sistema de tornillo sin fin, en donde se adicionan y mezclan los materiales.

Mortero dosificado en camiones de bachada volumétrica

Los camiones de bachada volumétrica, tienen compartimientos y tanques para almacenar agua, arena, cemento, cal y aditivos, mediante los cuales se pueden dosificar diferentes tipos de mortero, de tal forma que se mezcla y descarga mediante un sistema de tornillo sin fin en cada obra.

- **Morteros premezclados o predosificados**

Es posible conseguir morteros premezclados o predosificados en dos opciones: la primera es hacer una combinación premezclada, mojada de cal hidratada o pasta de cal, arena, aditivos y agua, enviada a la obra en construcción que queda lista para ser utilizada cuando se mezcla con cemento y agua adicional. La otra, es una mezcla empacada, seca que requiere únicamente la adición de agua y el mezclado. Se debe tener especial cuidado con el sistema seco, debido a que los morteros resultantes pueden necesitar una mezcla más prolongada para contrarrestar la mayor afinidad de la arena secada en horno con el agua y la subsecuente pérdida de trabajabilidad del mortero. La utilización del mortero premezclado va en incremento, porque pueden ser mezclas convencionales con características de trabajabilidad adecuadas por 2½ horas o mezclas de mayor duración.

Dentro de los morteros premezclados por vía húmeda se destacan los de larga vida, en los cuales se retarda el tiempo de fraguado generalmente por períodos de tiempo mucho más largos que los que se utilizan en el caso del concreto. Estos morteros, tienen la ventaja de que pueden ser recibidos durante el día y almacenados durante la noche para seguir siendo utilizados hasta por tres días. Los ensayos de laboratorio muestran que el mortero premezclado tiene mayor trabajabilidad, resistencia más uniforme y es más fácil de controlar que el mortero preparado en obra. Así mismo, la experiencia ha demostrado que las paredes construidas con mortero premezclado son menos impermeables.

Los aditivos que prolongan la vida en estado fresco del mortero, juegan un papel crítico en la producción de él y generalmente son una combinación de retardantes, retenedores de agua, reductores de agua e incorporadores de aire.

Dependiendo de la dosificación de los aditivos, es posible prolongar la vida del mortero entre 1 y 3 días, de tal forma que el mortero sin utilizar puede almacenarse en canecas debidamente

protegidas de la humedad. Una vez es extendido y entra en contacto con las unidades de mampostería comienza el proceso irreversible de fraguado.

Cuando el mortero es colocado entre las unidades de mampostería, estas absorben el agua y aditivos dentro del ella, lo cual causa que los aditivos para larga vida dejen de actuar, permitiendo que el mortero fragüe como una mezcla convencional.

Este material puede ser suministrado en camiones mezcladores, empacado en recipientes o bultos impermeables y transportados en vehículos apropiados. En proyectos grandes, también es posible instalar plantas móviles y reducir los costos por transporte.

En la obra, el mortero puede ser almacenado en canecas de 0,21 m^3 (55 G). Los recipientes más grandes son muy pesados y su manejo se hace difícil porque no se puede pasar por las ventanas ni puertas.

Figura 9.2. Mortero premezclado

Algunos de los beneficios del mortero de larga vida son:

- Se evita el mezclado manual en la obra en cualquier lugar.
- Se elimina el tener que mezclar mortero antes de iniciar las jornadas diarias de mampostería, con lo cual se gana tiempo y rinde más el trabajo.
- Se elimina el tiempo de los mamposteros refrescando y remezclando el mortero.
- No es necesario tener un área para almacenar arena y cemento, así como tampoco un sitio de mezclado, lo cual permite que las obras sean organizadas y limpias. Este punto es especialmente importante en aquellas que tienen limitaciones de espacio, como las de las áreas urbanas, en que en algunos casos puede ser necesario arrendar patios para almacenar materiales y equipo.
- Son de mayor uniformidad y calidad que los morteros mezclados a mano, puesto que en una planta la dosificación está muy bien controlada. La calidad uniforme del mortero no sólo resulta en una mejor construcción, sino que aumenta el rendimiento de la obra porque no hay que estar haciendo ajustes a la mezcla para que tenga la consistencia necesaria para lograr facilidad en la construcción.

Cuando se colocan los ladrillos o bloques de absorción normal, la succión que ocurre puede ocasionar que el mortero se rigidice y comience el proceso de fraguado, no obstante que el mortero sin usar permanecerá trabajable.

Propiedades del mortero

Las propiedades del mortero plástico determinan la facilidad de construcción de la mampostería y del acabado de los elementos estructurales. De la misma manera que en el caso del concreto,

las propiedades del mortero plástico influencian el comportamiento del mortero endurecido. Entre las propiedades plásticas del mortero que ayudan a determinar su adecuada construcción, están la trabajabilidad y retención de agua. Las propiedades en estado endurecido que ayudan a determinar el comportamiento final de la mampostería son la adherencia, durabilidad, elasticidad y resistencia a la compresión.

Muchas propiedades del mortero no son cuantitativamente definibles en términos precisos, debido a la carencia de especificaciones. Por estas y otras razones no hay normas completamente basadas en el comportamiento del material y en la mayoría de los casos se ha continuado la evaluación del mortero con base en operaciones tradicionales que permiten conocer de manera cualitativa sus propiedades.

Mortero en estado fresco

Sus características definen en primera instancia la calidad del material a utilizar. Por esto es importante conocerlas para utilizarlas como criterio de aceptación o rechazo.

- **Trabajabilidad o manejabilidad**

Es difícil de definir e igualmente de medir. Esta depende de su habilidad para ser extendido mediante un palustre o adherirse a superficies verticales y a su resistencia para fluir cuando se está colocando una unidad de mampostería. En los ensayos de laboratorio la trabajabiliad es reconocida como una compleja propiedad reológica que incluye adhesión, cohesión, fluidez, plasticidad y viscosidad. Al igual que en el caso del concreto no existe ningún método que por sí mismo la mida. Dependiendo de la absorción y material de la superficie sobre la que se esté colocando, esta propiedad varia.

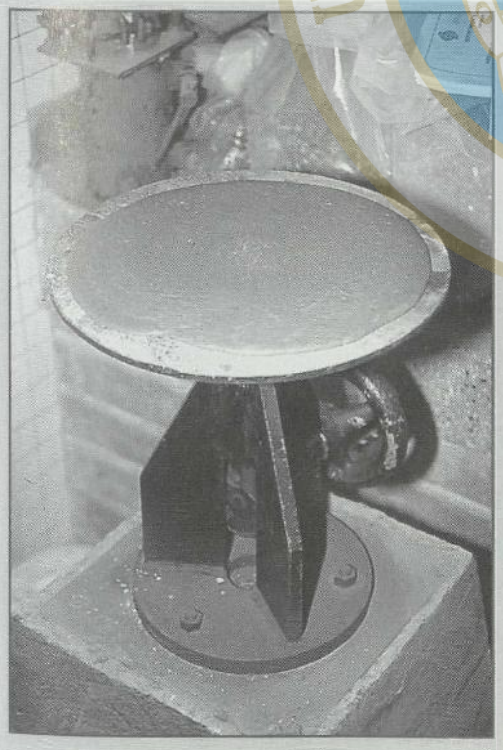


Figura 9.3. Ensayo de fluidez

La trabajabilidad, es el resultado de la lubricación de las partículas de agregados con la pasta de cemento. El ajuste final de la trabajabilidad, depende del contenido de agua, aunque está ampliamente afectada por la gradación, dosificación y contenido de aire. Esto puede ser estimado en el laboratorio mediante el ensayo de fluidez o del cono de penetración, este último puede emplearse como criterio de aceptación en la obra. La capacidad del mortero para mantenerse trabajable bajo la influencia de la absorción de la unidad de mampostería y de la tasa de evaporación, dependen de la retención de agua y de las características de fraguado del mortero. Una buena trabajabilidad es esencial para una adherencia máxima con las unidades de mampostería.

Los ensayos que se utilizan para estimar el grado de trabajabilidad son el de fluidez y penetración.

Fluidez

La fluidez inicial es una propiedad del mortero medida en laboratorio, que indica el porcentaje de aumento en el diámetro de la base de un cono truncado de mortero, cuando este se coloca sobre una mesa de flujo, levantándola mecánicamente 12,7 mm y dejándola caer 25 veces en 15 s. (Figura 9.3).

En el laboratorio, la evaluación de las propiedades del mortero se hace utilizando morteros de la misma fluidez, sin embargo esto no significa que tengan la misma trabajabilidad desde el punto de vista de un mampostero o albañil. El mortero de construcción normalmente requiere un mayor valor de fluidez que el mortero de laboratorio, y por consiguiente posee más contenido de agua.

Penetración

La consistencia del mortero es medida a través del cono de penetración, el cual consiste en un aparato de Vicat modificado, que permite conocer la uniformidad de una bachada a otra.

La determinación de consistencia por el cono de pene-tración, permite medir el ajuste en la cantidad de agua para todos los morteros y por lo tanto debe estar incluida en la serie de ensayos previos a la construcción.

Así mismo, la consistencia por el cono de penetración puede ser usada como una referencia rápida para indicar las variaciones de una bachada a otra en los ingredientes de mezcla y en el tiempo de mezclado. Lecturas erróneas de consistencia, indican un control deficiente durante la dosificación y el mezclado, pero esto no indica que las adiciones de cemento, arena o agua, sean inapropiadas. Se pueden usar otros métodos para aislar e identificar las proporciones o procedimientos de mezclado insatisfactorios, por ejemplo, relación cemento-agregado, agua en el mortero o ensayos de contenido de aire.

Por otro lado, este método permite evaluar la retención de consistencia de los morteros de mampostería en el sitio de trabajo, tal como se describe en el numeral más adelante. Puede ser usado como base para la aceptación de los morteros. Los resultados están dados en MPa (kg/cm^2) de presión necesaria para penetrar 2.54 cm en la muestra del mortero con un disco de diámetro y masa determinados.

La ASTM está estudiando otro método para medir la consistencia del mortero como una alternativa de los procedimientos descritos en la norma ASTM C780 (NTC 3546), denominado método Conway. Este utiliza un penetrómetro recalibrado para ser usado en mortero y el procedimiento consiste en colocar un anillo de 41 cm de diámetro sobre una mesa y llenarlo con mortero de mampostería, posteriormente enrasarlo y retirarlo para finalmente medir la fuerza de penetración de una aguja de 59 mm de diámetro a una profundidad de 25 mm. La fuerza leída es una medida relativa de la consistencia y rigidez del mortero, por lo tanto puede repetirse el ensayo a intervalos de 15 minutos y obtenerse la velocidad de endurecimiento. (Figura 9.4).

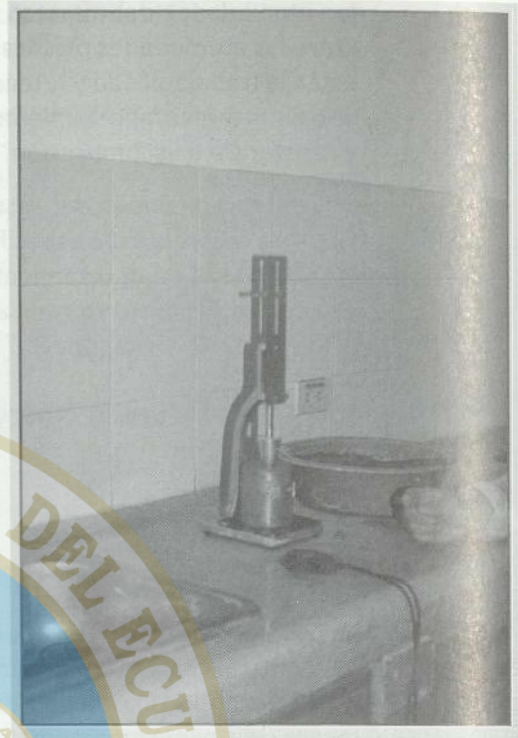


Figura 9.4a. *Ensayo de penetración*

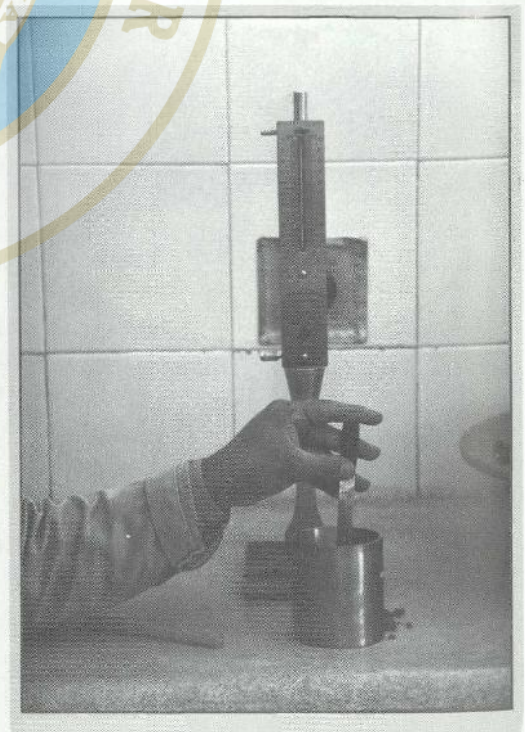


Figura 9.4b. *Ensayo de penetración*

Retención de la consistencia

La retención de consistencia, empleando un penetrómetro de concreto modificado sobre muestras de morteros alteradas e inalteradas, proveen un medio para establecer las características de fraguado y endurecimiento a temprana edad. Puesto que los ensayos de laboratorio son efectuados bajo condiciones climáticas estables, los resultados de los ensayos de retención de consistencia, reflejan el comportamiento del sistema de morteros bajo ensayo. Se puede esperar que ocurran las mismas relaciones durante los ensayos realizados en el sitio de construcción, excepto cuando éstas sean influenciadas por las condiciones ambientales en el sitio de trabajo.

- **Retención de agua**

Refleja la habilidad que tiene el mortero para retener el agua de mezcla, cuando es sujeto a fuerzas de absorción. Esta capacidad de retención de agua en campo, se evidencia cuando después de puesto en contacto el mortero con una unidad de mampostería de alto grado de absorción este conserva la trabajabilidad. Los morteros que tienen baja retención de agua pierden rápidamente el agua de mezcla y hacen que la colocación de unidades de mampostería sea difícil, mientras que los morteros de alta retención hacen muy fácil la colocación de las unidades de mampostería. La retención de agua y la absorción de las unidades de mampostería deben ser balanceadas para prevenir que las unidades queden flojas y causen demoras en la construcción.

Esta propiedad da tiempo al mampostero o albañil para colocar y ajustar una unidad de mampostería sin que el mortero se endurezca. La retención de agua es incrementada mediante la adición de cal, incorporadores de aire, utilización de arena fina dentro de los límites de gradación permitida, o usando materiales retenedores de agua. La retención de agua en laboratorio es una medida que compara el flujo de un mortero antes y después de aplicarle vacío.

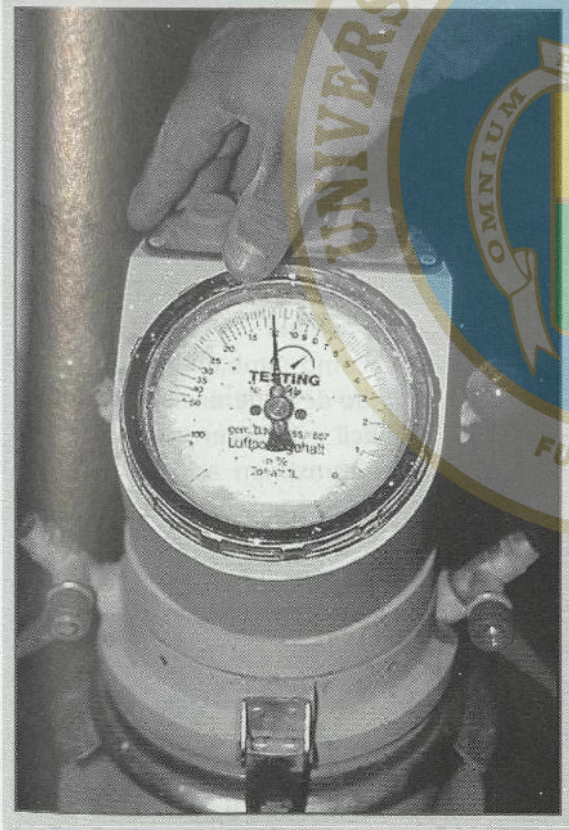


Figura 9.5. Medidor de contenido de aire

- **Contenido de aire**

Esta propiedad incide sobre las demás características del mortero, en estado fresco y endurecido, tales como la trabajabilidad y durabilidad. Es un valor necesario para cuantificar la calidad de un pañete o pega, en razón a que en exceso puede producir mortero desmoronable de mala calidad. La determinación del contenido de aire se hace mediante el método de presión o volumétrico empleando un equipo especial para mortero de 1 litro de capacidad. (Figura 9.5).

Características de la rigidización del mortero

El endurecimiento del mortero plástico se refiere a características de fraguado. El fraguado inicial, tal como es medido en el laboratorio para materiales cementantes, indica el grado de hidratación

o las características de fraguado de la pasta de cemento. Un endurecimiento rápido del mortero antes de su uso es perjudicial. Este se rigidiza a medida que pierde agua y se endurece mediante el fraguado normal del cemento. Esa transformación puede acelerarse con calor o retardarse con frío. Una velocidad consistente de rigidización le ayuda al mampostero en el acabado de juntas. Además, las características de rigidización son afectadas por los ingredientes y las proporciones de mezcla, condiciones ambientales, efectos de los aditivos químicos y el tiempo de mezcla.

Cuando se emplea el cono de penetración, se pueden establecer las características de fraguado y endurecimiento a temprana edad del mortero.

El mortero normalizado de manera común requiere una retención mínima de agua de 75%, con base en la fluidez inicial de 110 ± 5%. Estos materiales en la construcción, normalmente tienen una fluidez inicial, aunque no es frecuente su medida, de 140 ± 10% (50-60 mm mediante el cono de penetración) con el propósito de producir una trabajabilidad satisfactoria al mampostero. El requisito mínimo de flujo inicial para morteros mezclados en laboratorio fue establecido arbitrariamente, debido a que los morteros de baja fluidez indican una estrecha relación con la resistencia a la compresión en la mampostería, esto es porque la mayoría de las unidades podrían remover alguna cantidad de agua en el mortero una vez hacen contacto.

Mientras que puede haber algunas relaciones perceptibles entre la adherencia y la resistencia a la compresión, la relación entre la fluidez del mortero y la resistencia a la adherencia es aparente. Para la mayoría de los morteros y con algunas excepciones, pero en todas las unidades de mampostería de muy baja absorción, la adherencia se incrementa con el aumento de la fluidez y esto se detecta cuando comienza la salida de agua del mortero a la superficie (exudación).

Morteros endurecidos

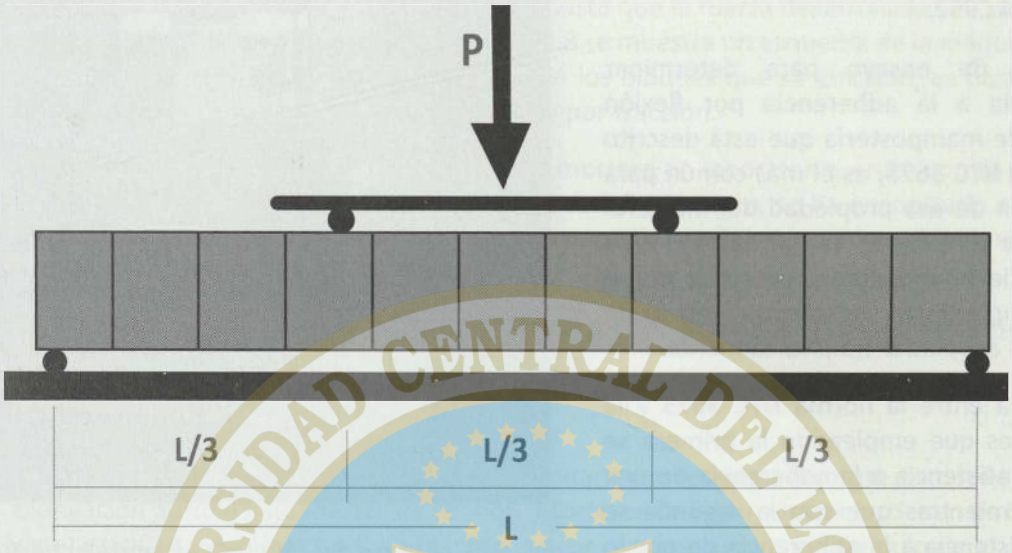
- **Adherencia**

Es la propiedad física individual más importante en el mortero endurecido, como también la más variable e impredecible. La adherencia tiene tres facetas: resistencia, grado de adherencia y durabilidad. Debido a que existen muchas variables que la afectan, es difícil establecer un solo ensayo de laboratorio que produzca resultados consistentes, que se aproximen a los resultados de obra. Estas variables incluyen contenido de aire, cohesividad, tiempo transcurrido después de ser extendido antes de la colocación de la unidad de mampostería, absorción de las unidades de mampostería, retención de agua del mortero, presión aplicada a la junta durante la colocación, acabado, textura de la superficie de pega de la unidad de mampostería y condiciones de curado.

La resistencia a la adherencia es desarrollada entre la unidad de mampostería y el mortero, y en estado fresco el mortero debe ser capaz de fluir sobre la unidad y llenar todas las cavidades de la superficie. La unidad de mampostería debe tener muchas irregularidades superficiales, para proveer adecuada adherencia mecánica y suficiente absorción para "chupar" el mortero dentro de esa superficie.

Esta propiedad se logra cuando el mortero entra en contacto con el ladrillo y continúa aumentando con la hidratación del cemento, su calidad es importante, no solamente para que resista las cargas aplicadas, sino también para absorber los esfuerzos originados por cambios volumétricos y de temperatura. En el laboratorio la resistencia a la adherencia es medida por la determinación del esfuerzo a cortante, flexión o tracción requerido para separar unidades de mampostería.

a) Norma NTC 3675. Montaje para el ensayo de adherencia por flexión



b) Norma NTC 3691. Aparato para ensayo de adherencia por tracción

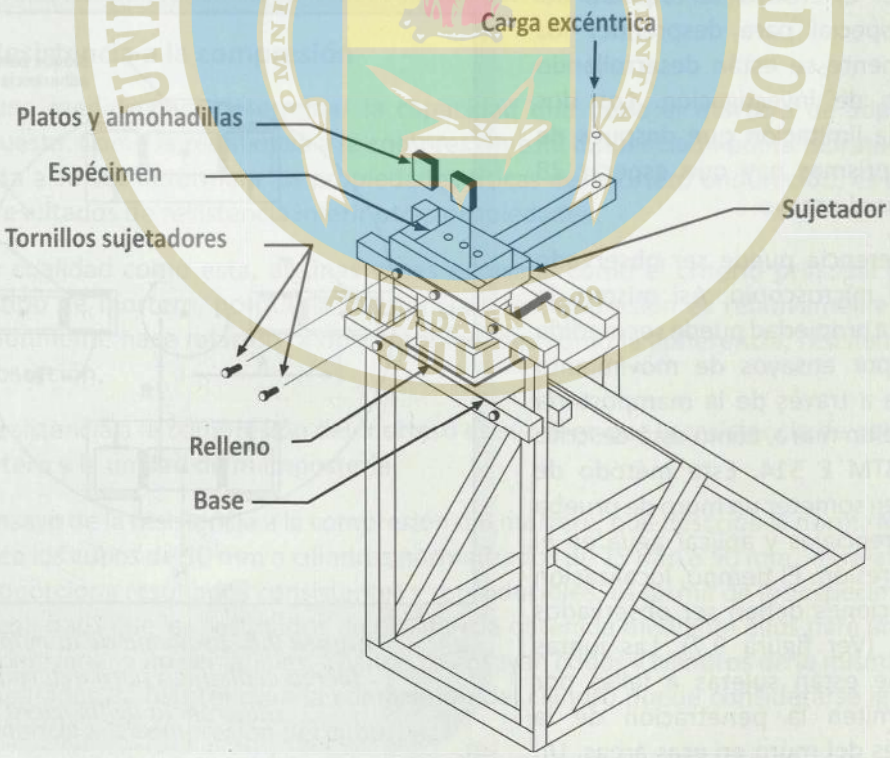


Figura 9.6. Montaje del ensayo para determinar la adherencia.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR SIB - UCE

La adherencia puede ser medida empleando el método de los dos ladrillos pegados transversalmente, tal como se describe en la norma ASTM C952.

El método de ensayo para determinar la resistencia a la adherencia por flexión adherente de mampostería que está descrito en la norma NTC 3675, es el más común para la evaluación de esa propiedad del mortero. Este método consiste en cargar hasta la falla un prisma de mampostería, ensayado como una viga simple. Este reemplaza el ensayo de las unidades acopladas transversalmente.

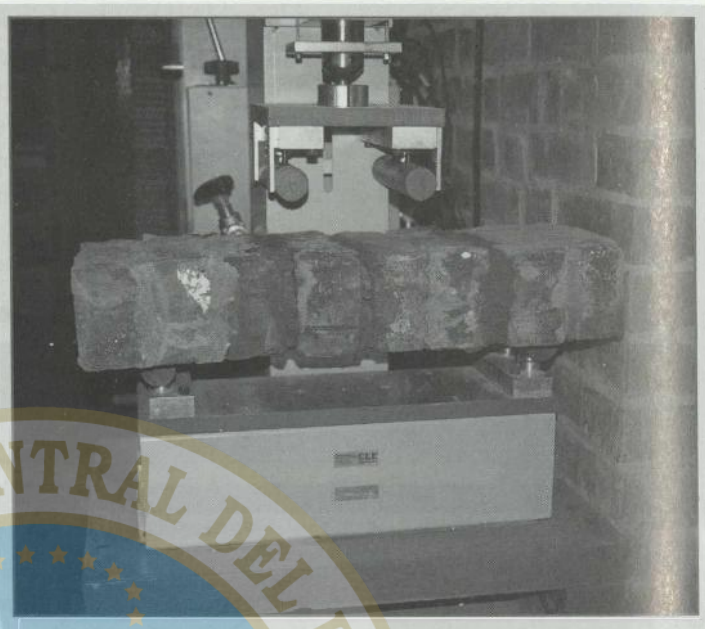


Figura 9.7. Montaje del ensayo flexión.

La diferencia entre la norma NTC 3675 y la NTC 3691, es que empleando la primera se obtiene la resistencia a la adherencia de una sola junta, mientras que con la segunda se mide la resistencia a la adherencia de por lo menos cinco juntas, ver figura 9.6. Esto hace que la segunda norma sea mejor. Sin embargo, para poder hacer el ensayo se requiere de una máquina especial para desprender los ladrillos, actualmente se están desarrollando nuevos métodos de investigación. Los dos ensayos tienen la limitación que después de construidos los prismas hay que esperar 28 días para efectuar el ensayo.

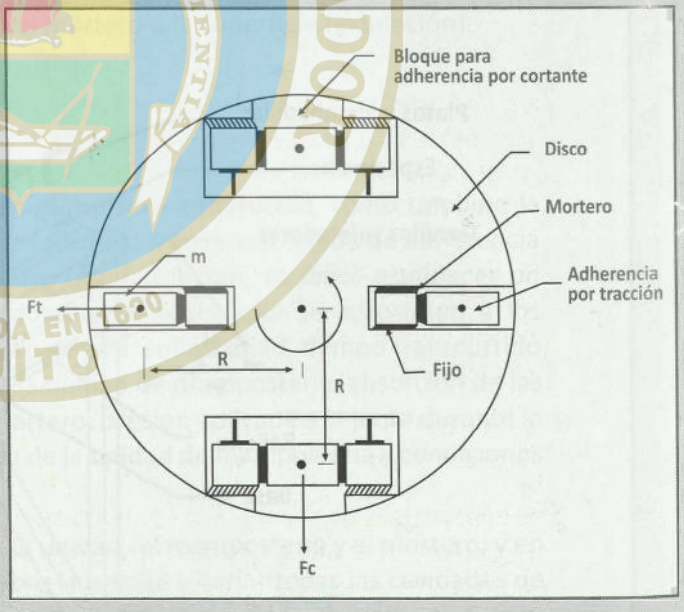


***Figura 9.8.** Esquema de la máquina de fuerza centrífuga para determinar la adherencia del mortero*

El grado de adherencia puede ser observado también bajo el microscopio. Así mismo, la deficiencia de esta propiedad puede ser medida indirectamente por ensayos de movimiento relativo del agua a través de la mampostería entre las caras de un muro, como está descrito en la norma ASTM E 514. Este método de ensayo consiste en someter un muro de prueba a presiones diferenciales y aplicar agua en el lado de mayor presión. El tiempo, localización y grado de filtraciones deben ser observados e interpretados. (Ver figura 9.7). Las juntas de morteros que están sujetas a fallas por adherencia permiten la penetración de la humedad a través del muro en esas áreas. Un contacto íntimo y completo entre el mortero y la unidad de mampostería es esencial para una buena adherencia. Esto se puede mejorar a través del uso de morteros que tengan una apropiada composición, buena trabajabilidad, y con una adecuada colocación.

La resistencia a la adherencia entre el mortero y unidades de mampostería de concreto liviano puede conocerse utilizando una máquina de fuerza centrífuga, en donde la fuerza es función de la masa m, del radio de rotación R, y la velocidad angular, w. Los especímenes se colocan en un disco rotatorio y se incrementa la velocidad hasta que la fuerza desarrollada sea suficiente para producir la falla por adherencia. En la figura 9.8 se muestra un esquema de la máquina de fuerza centrífuga, dependiendo de la orientación de los bloques que se ensayan, es posible también evaluar la adherencia por esfuerzo cortante y por tracción.

En general la resistencia a la adherencia del mortero en laboratorio, crece con el aumento del consumo de cemento. Debido a la trabajabilidad del mortero, se ha encontrado que morteros tipo S, tienen máxima resistencia a la tensión por adherencia que puede ser fácilmente alcanzada en la obra.

La adherencia del mortero es menor en superficies con acabados arenosos o cuarteados que en superficies rugosas o con acabados texturizados.

- **Extensibilidad y flujo plástico**

La extensibilidad es la máxima deformación unitaria por tensión a la rotura. Esto refleja la máxima elongación posible bajo fuerzas de tensión. Morteros de baja resistencia, tienen un bajo módulo de elasticidad y exhiben un flujo plástico mayor que las que tienen módulo de elasticidad alto a igual relación pasta-agregados. Por esta razón, morteros con resistencia más altas que las necesarias, no se deben usar. El flujo plástico o «creep» imparte flexibilidad a la mampostería, permitiendo pequeños movimientos sin la abertura aparente de juntas.

- **Resistencia a la compresión**

Es una medida para determinar la capacidad que tiene el mortero de soportar una fuerza impuesta. Como la resistencia a la compresión está influenciada por la hidratación del cemento y esta a su vez determina las propiedades físicas del mortero endurecido, es posible mediante los resultados de resistencia inferir otras propiedades.

Una cualidad como esta, algunas veces es usada como el criterio principal para la selección del tipo de mortero, porque la resistencia a la compresión es relativamente fácil de medir y comúnmente hace relación a otras propiedades como la adherencia, resistencia a la tensión y la absorción.

La resistencia a la compresión del mortero es superior que la resistencia de adherencia, entre el mortero y la unidad de mampostería.

El ensayo de la resistencia a la compresión del mortero, que describe la norma NTC 3546 usando, ya sea los cubos de 50 mm o cilindros normalizados de 75 mm o 50 mm, es relativamente simple y proporciona resultados consistentes y reproducibles. La forma de los especímenes (cilindros o cubos), hace que los resultados de resistencia obtenida mediante ellos para un mismo mortero puedan variar y no ser iguales. Cuando se ensayan cubos y cilindros de la misma mezcla para ser comparados, la resistencia a la compresión del cilindro puede considerarse igual al 85 % de la resistencia a la compresión del cubo.

La resistencia depende mucho del contenido de cemento y de la relación agua-cemento, esta crece con el aumento del contenido de cemento y disminuye con el aumento de cal, arena, agua o contenido de aire. El refrescado, está asociado con la disminución de la resistencia a la compresión del mortero. La reducción aumenta a mayor adición de agua y mayor tiempo entre

el mezclado y el refrescado. En la mayoría de los casos es deseable sacrificar un poco la resistencia a la compresión del mortero en favor del aumento de la adherencia, consecuentemente, se recomienda el refrescado dentro de límites de tiempo razonables para hacer mayor la adherencia.

No se depende únicamente de la resistencia como criterio para la selección del mortero. Una buena adherencia es generalmente más importante, así como una buena trabajabilidad y retención de agua. La resistencia a la flexión es también necesaria porque mide la capacidad del mortero para resistir agrietamiento. Frecuentemente se subestima la forma y tamaño de las juntas, debido a que la capacidad importante a la compresión de una junta horizontal de 9.5 mm, es probablemente el doble del valor obtenido cuando el mortero es ensayado en cubos de 50 mm.

El mortero debe ser típicamente más débil que la unidad de mampostería, de manera que las grietas no ocurran en los ladrillos, sino en las juntas, donde pueden ser fácilmente reparadas.

El ensayo de resistencia a la compresión de cilindros y cubos permite establecer las características de desarrollo de la resistencia del mortero. Las medidas dependen tanto del contenido de agua en el mortero en el momento del muestreo, como de otros factores y refleja la resistencia general que podría ser obtenida por el mortero en la mampostería. Sin embargo, el valor medido no debe ser considerado como representativo del valor real del mortero en la mampostería.

El ensayo de prismas empleando el método B de la norma ASTM E 447 para determinar la resistencia a la compresión de los mismos, más que evaluar la calidad es una forma de analizar el comportamiento entre los ladrillos y el tipo de mortero seleccionado.

Por último es importante anotar que la resistencia a la compresión obtenida en cilindros y cubos, refleja la resistencia aproximada del mortero, ya que es más probable que la relación agua/cemento de este sea menor en el muro, que la de los especímenes almacenados en condiciones controladas de laboratorio.

- **Resistencia a la tracción**

La resistencia a la tracción es bastante baja, pero más alta que la resistencia a la adherencia. Este punto no es crítico porque normalmente el mortero no es sometido a tracción y cuando se hace, se refuerza con acero.

Generalmente, se mide de forma indirecta (método brasileño) sobre cilindros de 50,8 por 101,6 mm o 76,2 por 152,4 mm, los cuales de la misma forma que en el concreto sirven para establecer las características del desarrollo de la resistencia a la tracción. La resistencia medida depende del contenido de agua en el momento del fraguado, además de otros factores, y refleja la resistencia en general que puede ser alcanzada por el mortero en la mampostería. Los valores medidos, sin embargo, no deben ser tomados como datos representativos de la resistencia real del mortero en la mampostería.

De la misma forma que la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción obtenida en el laboratorio puede ser inferior a la que realmente se presenta en campo por cuanto la relación agua/cemento del mortero colocado es menor.

- **Durabilidad**

Es la habilidad para resistir las condiciones de exposición a las cuales es sometido el mortero. Los ciclos de congelamiento y deshielo son considerados el principal efecto de deterioro en los países

de estaciones, mientras que los ataques por sustancias agresivas, tales como sulfatos y ácidos, son los factores que afectan la durabilidad en climas tropicales.

La durabilidad es una característica de una combinación particular de materiales que incluye, además de los constituyentes del mortero, la calidad de las unidades de mampostería empleada. Los ensayos acelerados de durabilidad realizados en el laboratorio bajo condiciones agresivas han demostrado que el grado de saturación de los ladrillos es una variable importante en la durabilidad de la mampostería.

La unión del mortero con cierta unidad de mampostería, diseñada sin consideraciones de exposición, puede llevar la unidad o el mortero a problemas de deterioro. Esto generalmente ocurre en paredes de mampostería, expuestas al calor en un sólo lado, en las cuales se reduce la vida potencial del mortero y se requiere de mantenimiento. Paredes expuestas en ambos lados, representan una extrema exposición y necesitan de un mortero con mejores condiciones de durabilidad.

- **Cambios volumétricos**

Las características de libre contracción del mortero son evaluadas en el laboratorio empleando especímenes prismáticos de 25*25*286 mm. La longitud de los prismas es medida como función del tiempo mientras permanecen almacenados al aire, ya que sufren contracción como consecuencia de la pérdida de humedad. La información de los cambios volumétricos es indicadora de las características de contracción del mortero colocado en mampostería y puede ser usada en análisis de los cambios de volumen de paredes y distribución de esfuerzos en mampostería.

- **Eflorescencia**

Es un depósito cristalino de sal soluble en agua, en ocasiones blanco, en la superficie o en los poros de la mampostería. El principal inconveniente es la aparición en la superficie eflorescente de la sal y la dificultad para removerla. Bajo ciertas circunstancias, cuando se presenta en el revestimiento exterior, la sal puede depositarse bajo la superficie de la unidad de mampostería y causar la desintegración de esta.

Es necesaria una combinación de circunstancias para la formación de la eflorescencia. Primero, debe haber una fuente de sal soluble. Segundo, debe haber una humedad ascendente que lleve las sales solubles a la superficie. Tercero, la evaporación o presión hidrostática debe causar la migración de la solución. Si algunas de estas condiciones es eliminada, no aparecerá.

Las sales pueden establecerse en la unidad de mampostería, en los componentes del mortero, aditivos o en otra fuente secundaria. La sal soluble en agua aparece en análisis químicos. La cantidad y el carácter de los depósitos varían de acuerdo con la naturaleza del material soluble y las condiciones atmosféricas. Preferiblemente los ensayos de grupos de mampostería o combinaciones de componentes deben estar bajo investigación.

La probabilidad de eflorescencia en la mampostería está relacionada directamente con los materiales y puede ser reducida con la selección estricta de los mismos. El potencial para la eflorescencia decrece cuando el contenido de álcali en el cemento disminuye. Los aditivos no deben ser usados en estos casos. La arena debe ser limpia y lavada.

La humedad puede entrar en la mampostería de varias formas. Debe prestarse mucha atención al diseño e instalaciones hidráulicas y sanitarias, para minimizar la probabilidad de filtraciones.

Durante la construcción, materiales de mampostería o muros sin terminar, deben estar protegidos de la lluvia o de la aplicación de agua de la obra. Un buen acabado de juntas y una compactación final a lo largo de la junta en forma cóncava del mortero, reducen la penetración del agua. Cuando la condensación ocurre dentro de la mampostería, es una fuente más de agua.

No obstante se seleccionen los materiales para la construcción de mampostería, es permitido un mínimo de sal soluble, la prevención de la migración de la humedad a través de la pared, la retiene en gran parte y disminuye la eflorescencia. Diseños de unidades de mampostería usando el principio de las presiones variables entre el exterior y el espacio vacío dentro de la pared, reducen en gran parte el chance de penetración del agua y consecuentemente reducen la eflorescencia.

La remoción de la eflorescencia de la superficie de la mampostería puede ser llevada a cabo por cepillado en seco. Siempre y cuando muchas sales sean altamente solubles en agua, estas pueden desaparecer por sí mismas bajo un proceso climático normal. Sin embargo, algunas sales requieren un duro tratamiento físico y algunas veces hasta químico para ser removidas.

Composición y efecto sobre las propiedades

Cada uno de los principales constituyentes del mortero hace una contribución definitiva para su desempeño. El cemento Pórtland ayuda con resistencia y durabilidad. La cal en estado hidróxido proporciona, trabajabilidad, retención de agua y elasticidad. Ambos, contribuyen con la resistencia adherente. Como una alternativa a las combinaciones de cemento Pórtland y cal, son usados frecuentemente cementos de mampostería. La arena actúa como relleno y permite que mantenga el cuerpo y espesor bajo la masa de la siguiente hilada de mampostería. El agua es el agente de mezcla que da fluidez y causa la hidratación del cemento.

Materiales cementantes

Como ya se ha dicho, el ingrediente cementante en morteros de mampostería es el cemento, que puede ser de mampostería o Pórtland. El cemento Pórtland contribuye con la resistencia del mortero, particularmente la resistencia inicial, lo cual es esencial para la rapidez de construcción.

La cal hidratada, que es un material cementante basado en la carbonatación, contribuye para la trabajabilidad, retención de agua y plasticidad. Los morteros con cal, sufren un proceso de carbonatación gradual bajo la influencia del bióxido de carbono presente en el aire, proceso que se ve disminuido en tiempo húmedo y frío. Debido a esto, el proceso de endurecimiento ocurre de manera lenta en un largo período de tiempo. Esto permite corregir pequeñas fisuras y resanarlas.

La cal reacciona cuando el agua está presente y sale del mortero a través del agua de evaporación por las fisuras y vacíos capilares.

Esto podrá causar algo de lechada, especialmente a edades tempranas. Depósitos sucesivos pueden llenar eventualmente las fisuras. Dichos resanes curativos tenderán a reducir la permanencia de agua.

El cemento Pórtland produce aproximadamente el 25% de su masa en hidróxido de calcio para una completa hidratación. Este último origina lo mismo que la cal durante la carbonatación, solubilizando y redepositando.

Agregados

Los agregados para morteros consisten en arenas naturales o artificiales y que en volumen y masa son el mayor constituyente. La arena actúa como un llenante inerte, generando economía, trabajabilidad y reducción de la retracción, al mismo tiempo incide en la resistencia a la compresión. Un incremento en la cantidad de este material, aumenta el tiempo de endurecimiento de un mortero de mampostería pero reduce las grietas potenciales debido a la retracción del mortero en conjunto. La arena estandarizada que se requiere para ciertos ensayos de laboratorio puede arrojar resultados diferentes que los utilizados en morteros de construcción.

En morteros plásticos los agregados bien gradados reducen la segregación, la exudación y mejoran la trabajabilidad. Arenas con deficiencias de finos producen morteros resistentes, mientras que las que tienen excesos de finos producen morteros de baja resistencia e incrementan la retracción. Contenidos altos de cal o aire en el mortero pueden requerir mayores cantidades de arena aún en agregados con una gradación pobre.

En arena con deficiencia de finos, los materiales cementantes pueden terminar cumpliendo esta deficiencia. Sin embargo, el exceso de finos en arenas es más usual y puede resultar sobrearenoso, aunque la manejabilidad no es sustancialmente afectada por dicho exceso.

Desafortunadamente, los agregados son frecuentemente seleccionados con base en factibilidad y costo, y no por la gradación. Las propiedades del mortero no son seriamente afectadas por alguna variación de la gradación, pero la calidad se mejora con una adecuada selección de los agregados. A menudo la gradación puede ser alcanzada fácilmente y con poco costo, con la adición de finos o arenas gruesas. Frecuentemente es más importante un método apropiado para proporcionar mortero con la arena disponible, que especificar una gradación particular.

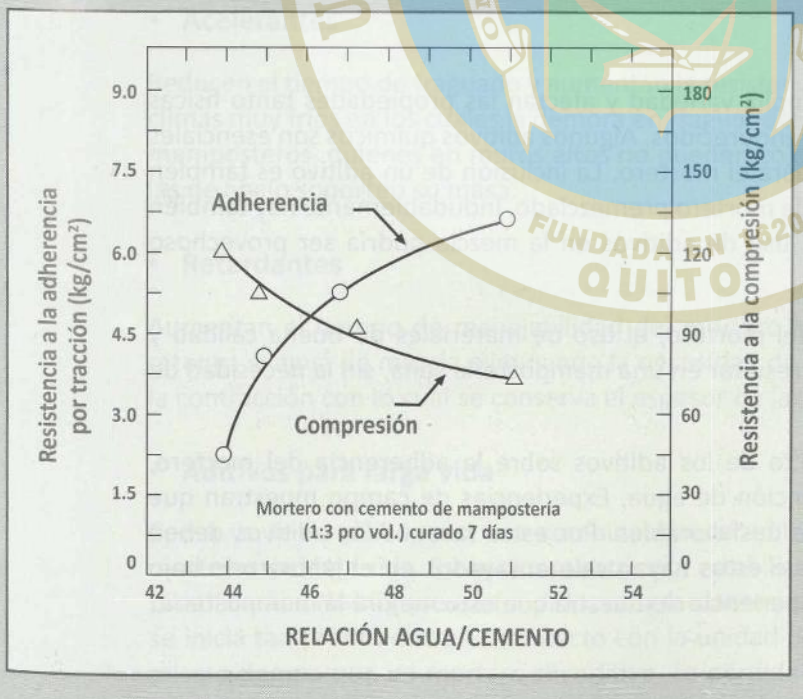


Figura 9.9. *Efecto de la relación agua/cemento de morteros de cemento de mampostería sobre la adherencia y la resistencia a la compresión.(14)*

Agua

El agua realiza tres funciones, controla el grado de trabajabilidad, hidrata el cemento y facilita la carbonatación de la cal. La cantidad de agua necesaria depende en primer lugar de los ingredientes del mortero. Debe estar limpia y libre de elementos nocivos o sustancias que sean perjudiciales para el mortero o para el refuerzo. Usualmente, el agua potable es aceptable.

La cantidad de agua es posiblemente un aspecto mal comprendido del mortero de mampostería, probablemente debido a la confusión entre los requerimientos del mortero y del

concreto. Los requerimientos de agua del mortero son bastante diferentes de los del concreto en donde se requiere una baja relación agua/cemento.

Debido a que no toda la mezcla de mortero se utiliza en una sola operación, se hace necesaria una adición de agua para refrescar el mortero recuperando la consistencia inicial. Esta adición dentro de un tiempo límite es permitida. A pesar de que la resistencia a la compresión del mortero se disminuye cuando se le ha adicionado agua, usualmente la adherencia se ve incrementada.

En la figura 9.9 se muestran los resultados reportados por Isberber en un estudio para demostrar el efecto de la adición de agua sobre la resistencia a la compresión y la adherencia. En ella se observa que una adición de agua se traduce en una mejor adherencia pero con una menor resistencia. La adición de agua causa en el flujo de esos morteros incrementos progresivos de 100 % a 135 % y aumentos en el contenido de aire de 11,8% a 13,5%. Por esta razón el refrescado solo debe hacerse para sustituir el agua que se ha perdido por evaporación.

Debido a que el daño de esta adición de agua solamente se produce cuando el mortero ha comenzado a fraguar, todo el material debe colocarse en su posición final tan pronto como sea posible, pero siempre dentro de las 2½ horas después del mezclado, si no es de larga vida.

En la norma NTC 3329 para morteros de mampostería se especifica como requisito de mezclado que se debe usar la máxima cantidad de agua para producir una consistencia trabajable. La producción de morteros con altos contenidos de agua mejora la trabajabilidad y la adherencia a expensas de la resistencia a la compresión, la durabilidad y los cambios volumétricos. Los morteros con alto contenido de agua fluyen más fácil y permiten que las unidades de mampostería absorban más agua y que exista mayor cantidad de agua disponible para los procesos de hidratación.

Aditivos

Los aditivos están disponibles en una amplia variedad y afectan las propiedades tanto físicas como químicas de los morteros frescos o endurecidos. Algunos aditivos químicos son esenciales en la producción de materiales básicos para el mortero. La inclusión de un aditivo es también necesaria para la producción de mezclas de mortero premezclado. Indudablemente hay también algunas situaciones especiales donde el uso de aditivos en la mezcla podría ser provechoso adicionándose en el sito de la mezcla.

Una cuidadosa selección de la mezcla del mortero, el uso de materiales de buena calidad y una buena práctica, usualmente pueden resultar en una mampostería sana, sin la necesidad de utilizar aditivos.

Existe poca información acerca del efecto de los aditivos sobre la adherencia del mortero, la resistencia a la compresión, o la retención de agua. Experiencias de campo muestran que frecuentemente se presentan resultados desfavorables. Por estas razones los aditivos deben ser utilizados en la obra sólo después que estos hayan sido ensayados en el laboratorio bajo condiciones similares a las de uso, y la experiencia demuestra que esto mejora la mampostería.

- **Incorporadores de aire**

Los agentes incorporadores de aire adicionados al cemento durante su fabricación juegan un rol importante a lo largo del período de mezclado, así como también, después del mismo. Durante el mezclado, estos agentes forman burbujas de aire, las cuales contribuyen a incrementar la

trabajabilidad, cohesividad y retención de agua, adicionalmente en estado endurecido disminuyen la impermeabilidad y favorecen el comportamiento del mortero frente a agentes agresivos. Al igual que en las mezclas de concreto la inclusión de aire en el mortero de mampostería reduce la resistencia a la compresión.

El uso descontrolado de agentes inclusores de aire debe ser prohibido. Para altos niveles de aire, existe definida una relación inversa entre el contenido de aire y las propiedades medidas en el laboratorio. En general, algún aumento en el contenido de aire, es acompañado por una disminución en la adherencia así como la resistencia a la compresión. Resultados de ensayos indican que la disminución de esfuerzos de adherencia entre morteros de relleno (grouts) y refuerzo de acero, está asociada con altos contenidos de aire.

Algunos sistemas de morteros con alta inclusión de aire pueden utilizar mayor cantidad de arena sin perder manejabilidad, la cual si se usa en exceso puede ser perjudicial para la mampostería. El uso de un mortero que contenga materiales inclusores de aire o donde los niveles de contenido de aire son altos o desconocidos, debe estar basado en un conocimiento de las condiciones locales, o en los ensayos de laboratorio de los morteros y prismas de mampostería.

La incorporación de aire es recomendable en clima frío (menos de 5 °C) porque reduce el contenido de agua que podría congelarse a edades tempranas.

El contenido máximo de aire para el mortero que tiene refuerzo embebido es del 12% si es elaborado con cemento Pórtland y con cemento de mampostería se permite el 18% (ver norma NTC 3329).

- **Acelerantes**

Reducen el tiempo de fraguado y aumentan la resistencia a edades tempranas, su uso se limita a climas muy fríos en los cuales la demora en fraguar del mortero disminuye el rendimiento de los mamposteros, quienes en muros altos no pueden colocar muchas hiladas de ladrillo hasta que las de abajo soporten su masa.

- **Retardantes**

Aumentan el tiempo de manejabilidad del mortero hasta por 5 horas y ayudan para que se retenga el agua de mezcla eliminando la necesidad de refrescarlo. Contribuyen en el control de la contracción con lo cual se conserva el espesor de las juntas.

- **Aditivos para larga vida**

Como ya se ha dicho, son una combinación de aditivos que se utilizan en la producción de morteros de larga vida. Están compuestos por estabilizadores retenedores de agua y retardantes plastificantes. No hay que confundirlo con retardantes, puesto que lo que ocurre es que el fraguado se inicia tan pronto entra en contacto con la unidad de mampostería y toma prácticamente el mismo tiempo que un mortero sin aditivo. La pérdida de manejabilidad y el fraguado se inicia una vez los compuestos son absorbidos por las unidades de mampostería permitiendo que se produzca el proceso normal de hidratación. De manera análoga a los retardantes, la dosis de estos aditivos se debe incrementar en la medida que aumenta la temperatura, porque la velocidad de la reacción química del cemento con el agua se aumenta con la temperatura.

- **Repelentes de agua integrales**

Pueden reducir la absorción de agua del mortero endurecido en un 60% sin disminuir la resistencia de diseño, por lo cual es recomendable para el mortero de pega y pañete de muros exteriores. Cuando se usa esta clase de aditivos, es conveniente remojar con él la superficie de los ladrillos que estarán en contacto con el mortero, porque se corre el riesgo de impedir la adherencia.

Esta clase de aditivos es muy sensible en la dosificación, por lo cual es importante seguir paso a paso las indicaciones dadas por el fabricante. Una sobredosis puede reducir la adherencia y retardar el fraguado ya que los repelentes de agua reducen la transmisión de vapor, haciendo que este se condense en la junta entre el mortero y el ladrillo.

- **Modificadores de adherencia**

Mejoran la adherencia, así como la densidad superficial del mortero. Son recomendados para aumentar la adherencia a las unidades de mampostería muy lisas y de baja absorción. Los fabricantes indican que no debe ser empleado en combinación con incorporadores de aire.

- **Pigmentos colorantes**

El mortero coloreado se utiliza con fines decorativos, bien sea cuando se utiliza como pega o como pañete (repello). Se puede agregar color al mortero utilizando agregados seleccionados y pigmentos inorgánicos. Estos últimos deben ser compuestos de óxidos minerales y no deberán exceder el 10% de la masa del cemento Pórtland, limitando el carbón negro a un 2% para evitar una reducción en la resistencia. Los pigmentos deben escogerse cuidadosamente y utilizarse en cantidades pequeñas que produzcan el color deseado.

Para minimizar las variaciones de una bachada a otra es recomendable utilizar materiales cementantes a los cuales se les ha añadido el colorante en la fábrica o utilizar compuestos colorantes del mismo lote para cada bachada de mortero. Así mismo, se recomienda mezclar la mayor cantidad de mortero que sea posible utilizar sin necesidad de refrescar, puesto que al adicionar agua se puede variar el color. Los procedimientos de mezclado deben permanecer constantes para lograr la consistencia en el color.

- **Inhibidores de corrosión**

Eliminan el efecto del ión cloruro y previenen la corrosión del acero. Se emplea en los morteros con armadura embebida que se colocan en ambientes marinos. Pueden acelerar el tiempo de fraguado y reducir el contenido de aire.

Factores que afectan las propiedades del mortero

Los factores que afectan el comportamiento y las propiedades del mortero son: el diseño, los materiales, los procedimientos y la mano de obra seleccionados o utilizados.

La supervisión, inspección y ensayos necesarios para cumplir con los requerimientos deben ser los apropiados y estar determinados con anterioridad.

- **Curado**

Es recomendable un adecuado curado para prolongar el proceso de hidratación del cemento. La continua aplicación de agua y el mantenimiento de medios ambientes húmedos, prolongan el

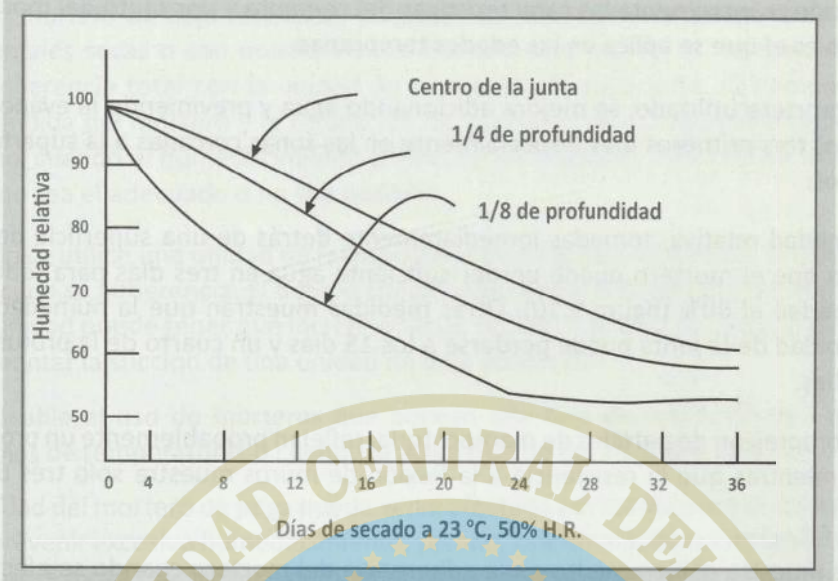


Figura 9.10. Humedad relativa del mortero elaborado con cemento de mampostería como una función del tiempo de secado.(14)

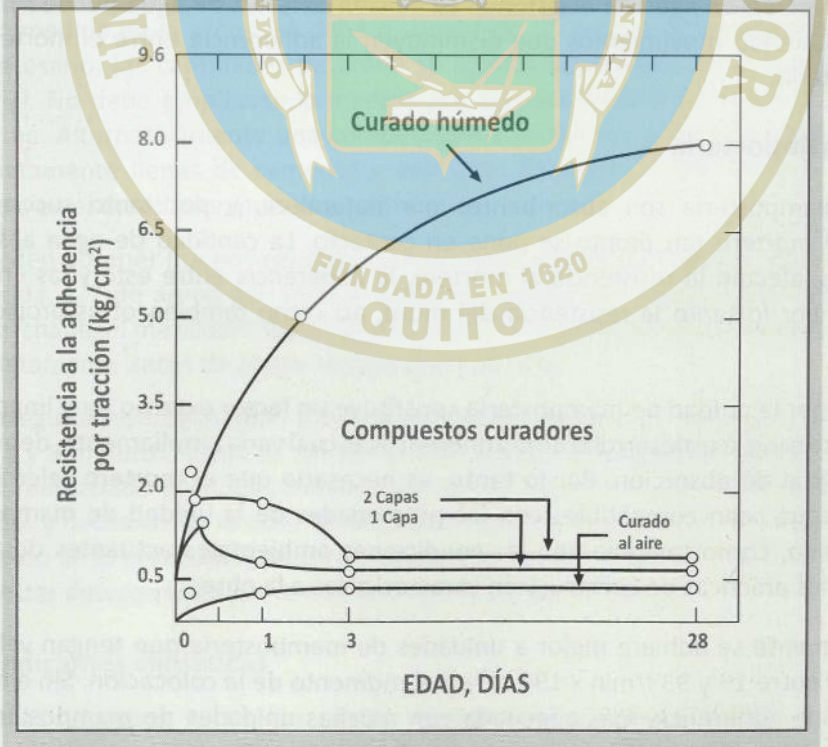


Figura 9.11. Efecto del curado sobre la adherencia del mortero a la mampostería.(14)

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTEST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

período de hidratación e incrementa las características del cemento y por tanto del mortero. El curado más efectivo es el que se aplica en las edades tempranas.

La hidratación del mortero utilizado, se mejora adicionando agua y previniendo la evaporación al menos durante los tres primeros días, especialmente en las zonas cercanas a la superficie de junta con los ladrillos.

Medidas de la humedad relativa, tomadas inmediatamente detrás de una superficie de junta expuesta, muestran que el mortero puede perder suficiente agua en tres días para reducir su porcentaje de humedad al 80% (figura 9.10). Otras medidas muestran que la humedad en la mitad de la profundidad de la junta puede perderse a los 15 días y un cuarto de la profundidad se pierde a los 12 días.

La resistencia a la compresión de paredes de mampostería, reflejan probablemente un promedio de estos tiempos, mientras que la resistencia a la flexión de muros muestra sólo tres días de hidratación.

En la figura 9.11 se muestra el incremento en la adherencia del mortero cuando se efectúa un adecuado curado. La humedad ayuda a desarrollar resistencia de adherencia mucho más alta que la obtenida cuando no se cura. La aplicación de los compuestos curadores, inmediatamente después de la colocación, es parcialmente efectiva en el incremento de la resistencia.

Un secado prematuro puede afectar la calidad de la mampostería. Curar el mortero con la adición considerable de agua a la unidad de mampostería podría resultar menos eficiente que el curado del mortero por retención de agua en el sistema. La adición excesiva de agua puede saturar la mampostería, produciendo movimientos que disminuyen la adherencia entre el mortero y la unidad de mampostería.

- **Unidades de mampostería**

Las unidades de mampostería son absor-bentes por naturaleza, y por tanto succionan el agua de mezcla del mortero tan pronto se pone en contacto. La cantidad de agua absorbida y sus consecuencias, afectan la resistencia al mortero, la adherencia entre este y las unidades de mampostería, y por lo tanto la resistencia del muro, así como también otras propiedades constructivas.

La succión ejercida por la unidad de mampostería constituye un factor externo muy importante que afecta el mortero e inicia el desarrollo de la adherencia, el cual varía ampliamente, de acuerdo con la velocidad inicial de absorción. Por lo tanto, es necesario que el mortero seleccionado tenga propiedades que sean compatibles con las propiedades de la unidad de mampostería que se esté utilizando, como también con las condiciones ambientales actuantes durante la construcción y con las prácticas de construcción características a la obra.

El mortero generalmente se adhiere mejor a unidades de mampostería que tengan velocidad inicial de absorción entre 19 y 93 l/min x 194 m^2 en el momento de la colocación. Sin embargo, puede obtenerse una adherencia más adecuada con muchas unidades de mampostería que tengan menores o mayores velocidades iniciales.

La extracción de mucha o muy poca agua del mortero tiende a reducir la adherencia entre la unidad de mampostería y el mortero. Una pérdida de mucha agua puede haber sido causada

por un mortero de baja retención, unidades de mampostería de alta absorción o condiciones ambientales secas o con mucho viento. Cuando esto ocurre, el mortero es incapaz de lograr una adherencia total con la unidad de mampostería adyacente. El tiempo transcurrido entre la extendida del mortero y la colocación de la unidad de mampostería debe mantenerse en el mínimo, cuando el humedecimiento previo de las unidades para reducir la succión ejercida por estas no sea el adecuado o no sea posible.

Cuando se utilice una unidad de mampostería de muy baja absorción, la unidad tiende a flotar y se dificulta su adherencia. El tiempo transcurrido entre el espaciado del mortero y la colocación de la unidad puede tener que incrementarse, debido a que no se dispone de ningún medio para incrementar la succión de una unidad de baja absorción.

Es deseable el uso de morteros que posean alta tasa de retención de agua, en condiciones extremas de temperaturas o cuando la absorción de las unidades es alta.

La calidad del mortero de pega puede verse afectada por cambios en el volumen de las unidades. Para prevenir excesivo humedecimiento, secado, calentamiento o enfriamiento, el mortero debe protegerse hasta que alcance por lo menos su asentamiento final.

- **Práctica de construcción**

Una cuidadosa atención de la buena práctica en el sitio de construcción es esencial para lograr una buena calidad. Los materiales cementosos y agregados deben protegerse de la lluvia, humedad y en general de cualquier contaminante.

Para la medida de la arena, se debe disponer de un recipiente de volumen conocido. Cuando sea necesario, las cantidades de arena se ajustarán teniendo en cuenta el hinchamiento del material. No debe emplearse la medida por paladas cuando se desee un mortero de calidad uniforme. Alternativamente una combinación volumétrica calibrada entre adiciones de bolsas completamente llenas de cemento y adiciones de arena, asegurando el mismo volumen de mortero en el mezclador, puede ser adecuada.

Se pueden obtener buenos resultados mezclando, rápidamente y a la vez, cerca de 3/4 del agua requerida, 1/2 de arena con todo el cemento; agregando luego el resto de arena y agua. Para cada bachada, el mezclador debe cargarse hasta su máxima capacidad de diseño, desocupándolo completamente antes de cargar la siguiente bachada.

Para asegurar homogeneidad y trabajabilidad del mortero, el tiempo de mezclado debe estar entre 3 y 5 minutos, después de que la última parte del agua de mezclado ha sido adicionada. Un sobremezclado produce cambios en el contenido de aire del mortero. El empleo de paletas gastadas y cucharas de caucho tiene gran influencia en el tiempo de mezclado. Se recomienda el empleo en el mezclador, de controladores de tiempo automáticos. El tiempo de mezclado no debe estar determinado por la demanda de la fuerza de trabajo.

- **Condiciones climáticas**

En climas calurosos, secos, con viento, el mortero debe tener una elevada retención de agua para minimizar el efecto de la pérdida de agua por evaporación. Para disminuir el riesgo de baja adherencia en climas muy fríos, las unidades de mampostería, principalmente las superficies que van a estar en contacto con el mortero, deben llevarse a unas temperaturas superiores a los 0 °C antes de comenzar cualquier labor.

- **Mano de obra**

La influencia en la resistencia y adherencia que tiene la mano de obra es muy grande. El tiempo transcurrido entre la colación del mortero y la de las unidades debe ser el mínimo posible, debido a que la fluidez de la primera tanda se reduce rápidamente. Este tiempo normalmente no debe exceder el minuto. En climas cálidos, secos y con vientos o cuando las unidades son muy absorbentes, este tiempo debe ser menor. Si es mayor, la adherencia se verá disminuida. Es esencial la eliminación de irregularidades profundas, así como la creación de juntas. Todo refuerzo de metal debe quedar completamente embebido en el mortero.

Una vez que el mortero ha comenzado a endurecer, cualquier movimiento que se le haga a las unidades, origina una disminución en la adherencia, en razón a que el mortero ya no es suficientemente plástico para restablecerla.

La preparación de las juntas debe hacerse cuando su superficie está dura empleando un paletín de cualquier configuración de la junta diferente de la cóncava, que puede provocar un incremento en la retención de agua. Las juntas de impacto con el mismo grado de dureza, producen una junta de apariencia uniforme. El acabado se hace no sólo por apariencia, sino para sellar la interfase entre el mortero y las unidades de mampostería, densificando la superficie de la junta.

Los beneficios de las operaciones de acabado deben protegerse de una limpieza inadecuada. El empleo de químicos fuertes así como de métodos físicos ásperos o duros, puede afectar negativamente al mortero, especialmente los coloreados. La mayoría de los químicos usados, atacan el material cementante del mortero y agrandan las fisuras entre este y la unidad de mampostería.

Foto 9.12. Mortero de relleno

Mortero de relleno para mampostería

El mortero de relleno para mampostería o grout está definido por el comité ACI 116 como una mezcla de material cementante y agua, con o sin agregados, proporcionada para producir una consistencia fluida (autonivelante) sin segregación de sus constituyentes, así mismo, se aplica a este término las mezclas con otra composición que producen la misma consistencia. El mortero de relleno para mampostería se diferencia entonces del mortero de pega o pañete, y en que es autonivelante.

La diferencia práctica entre el mortero y el de relleno de mampostería está en que el primero se usa como material de junta y pega mientras que el segundo fluye y rellena cavidades.

- **Ensayos sobre el mortero de relleno para mampostería**

La consistencia del mortero de relleno para mampostería se puede medir empleando el cono de Abrams de acuerdo con la norma NTC 396, con el cual se obtiene un rango de asentamiento entre

20 cm y 28 cm. Para fluidos que no contienen agregado o sólo contienen del fino (pasa Tamiz Nº8) se debe seguir el procedimiento de la norma ASTM C939 que describe los ensayos para el relleno empleado en el concreto de agregado precolocado.

Cuando el mortero de relleno para mam-postería se demora más de 35 segundos en fluir en el cono de Abrams se recomienda determinar la consistencia con la mesa de flujo haciendo 5 golpes en 3 segundos, independientemente del método utilizado para medir la consistencia, esta es un factor importante y debe hacer parte de las especificaciones.

Cuando se desea efectuar ensayos a la compresión del mortero de relleno para mampostería, no se recomienda emplear moldes cilíndricos normalizados para la toma de muestras de concreto. Esto se debe a que en la mampostería los ladrillos absorben parte del agua de mezcla y reducen la relación a/c , incrementando con ello la resistencia, de tal forma que la resistencia obtenida sobre cilindros es menor que la obtenida en una estructura. Para tomar muestras se pueden usar moldes no absorbentes.

Las muestras de mortero de relleno para el ensayo de resistencia a la compresión se deben tomar por cada 465 m^2 de mampostería, así como cuando se presente un cambio en las proporciones de la mezcla, o en el método de mezclado o en los materiales usados.

La norma ASTM C 942 describe el método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de mortero de relleno expansivo, la toma de muestras se realiza en cubos confinados de 5 cm de arista.

Necesidad de control de calidad

De la misma manera que para el concreto, la evaluación previa de morteros involucra la preparación de una o más mezclas de ensayo, elaboradas en el laboratorio, usando mezcladoras mecánicas. Estas mezclas son muestreadas y usadas para determinar las propiedades en estado plástico y endurecido. Como todas las mezclas de ensayo son dosificadas por masa, se puede calcular y analizar características adicionales de los morteros que pueden ser usadas en el análisis del comportamiento del mortero.

Durante la ejecución de la obra es posible la evaluación de los morteros de mampostería por muestreo de mortero en varias etapas de la construcción, realizando ensayos en estado plástico y endurecido. Los resultados permiten además la verificación de los ensayos previos y reflejan de una bachada a otra, las variaciones introducidas durante la producción del mortero y su uso en el sitio de construcción. La acción correctiva más inmediata sobre el procedimiento de mezclado es por lo tanto viable.

Durante las evaluaciones previas a la construcción y durante ella, el uso de estos métodos de ensayo, establecen el comportamiento específico y completo de las características para el sistema de mortero.

Los ensayos previos a la construcción de los morteros premezclados por masa, permiten la selección del sistema individual de mortero más adecuado para la mampostería. No obstante, el control de calidad del mortero en la obra no es usualmente practicado. Las propiedades del mortero deben revisarse durante los procesos constructivos mediante ensayos de fluidez o penetración, para estimar la trabajabilidad y contenido de aire. Por otro lado, se deben tomar muestras que permitan conocer la resistencia a la compresión y hacer muretes para verificar que la adherencia es adecuada.

No existe norma ASTM para medir la composición o propiedades físicas de morteros endurecidos en una estructura. En la tabla 9.7 se enumeran las normas para el control de calidad del mortero:

Tabla 9.7. *Normas relativas al mortero*

NORMA	TÍTULO
NTC 2240	Agregados usados en morteros de mampostería
NTC 3329	Mortero para unidades de mampostería
NTC 3356	Mortero premezclado para unidades de mampostería
NTC 3546	Ensayos de laboratorio y obra para la evaluación de morteros para unidades de mampostería
NTC 3675	Métodos de ensayo para adherencia por flexión de mampostería
NTC 3691	Método para medir la adherencia por flexión de mampostería
NTC 4027	Especificaciones del cemento para mampostería
ASTM C952	Método para determinar la resistencia a la adherencia del mortero a las unidades de mampostería

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIA ESTO SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

LISTAS DE CHEQUEO

Capítulo 10

A continuación se presentan las listas de chequeo para la realización de los siguientes ensayos realizados sobre concreto: toma de muestras, elaboración y curado de cilindros, asentamiento, temperatura, masa unitaria, contenido de aire, refrentado con mortero de azufre y resistencia a la compresión y flexión. Estas listas pueden ser utilizadas para verificar que durante la ejecución de ensayos se realicen los puntos claves de acuerdo con las normas.

1 . TOMA DE MUESTRAS

		ASTM C172 Numeral	NTC 454 Numeral
1.	Obtenga una muestra representativa (por ejemplo agitando la olla de mezclado)		
	• Tome muestras en dos o más intervalos regularmente espaciados durante la descarga de la porción media de la bachada	5.2.1.	4.2.3
	• Pase el recipiente repetidamente a través de la descarga del concreto o desvíe toda la descarga hacia el recipiente para tomar muestras	5.2.1.	4.2.3
	• Transporte las muestras al sitio de ensayo	4.1.1.	3.1.1
	• Remezcle las muestras compuestas	4.1.1./5.2.1.	3.1.1/4.2.3
	• Obtenga una mezcla compuesta dentro de un intervalo de 15 minutos	4.1.	3.1
	• El tamaño mínimo de la muestra para ensayos de resistencia debe ser 28 Litros	5.1.	4.1
2.	Inicie el ensayo de asentamiento y contenido de aire dentro de los 5 minutos siguientes a la obtención de la muestra compuesta	4.1.2.	3.1.2
3.	Inicie el moldeo de los cilindros dentro de los 15 minutos siguientes a la obtención de la muestra compuesta	4.1.2.	3.1.2
4.	Proteja la muestra de la evaporación y contaminación	4.1.2.	3.1.2

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1620
QUITO

2. ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO EN OBRA

		ASTM C31 Numeral	NTC 550 Numeral
1.	Coloque los moldes en una superficie horizontal, nivelada, rígida, libre de vibración o cualquier otra perturbación	7.1.	8.1
2.	Seleccione una muestra representativa, de acuerdo con la ASTM C 172 (NTC 454)	7.1.	6.1
3.	Descargue el concreto utilizando una cuchara, pala o palustre, moviéndo-la en el perímetro del molde	9.2.	8.2
4.	Distribuya el concreto usando la varilla compactadora	9.2.	8.2
	Para cilindros, siga el procedimiento descrito hasta el numeral 4 y adicionalmente:		
A.	Llene el recipiente en tres capas de igual volumen	9.4.1.	8.2.1
	• Compacte cada capa compactando 25 veces con el extremo semiesférico, distribuyendo los golpes de manera uniforme	9.4.1.	8.3.2
	• Compacte la capa inferior a través de su espesor sin golpear el fondo del molde	9.4.1.	8.1.2/8.3.2
	• Compacte la capa intermedia y la superior, a través de su espesor, permitiendo que la varilla penetre aproximadamente 25 mm en la capa previa	Tabla 3	8.3.2
	• Cuando se coloca la última capa se debe adicionar la cantidad de concreto necesario para que el molde quede lleno	9.4.1.	8.2.1
	• Si la varilla compactadora deja huecos, golpee los lados del molde con el mazo o la mano abierta después de cada capa	9.4.2.	8.3.2
	• Enrase el nivel del concreto con la parte superior del recipiente usando la varilla, si es necesario, afine con una llana o palustre	9.5.1.	8.4/8.4.1
•	Cubra el espécimen con una lámina no absorbente	Nota 6	9.1
	Para viguetas, siga el procedimiento descrito hasta el numeral 4 y adicionalmente:		
B.	Llene el recipiente en dos capas de igual volumen	9.4.1.	8.2.1
	• El número de golpes requeridos para compactar cada capa se calcula dividiendo el área superficial de la vigueta entre 13	9.4.1.	8.3.2
	• Compacte cada capa con el extremo semiesférico de la varilla, distribuyendo los golpes de manera uniforme, penetrando 12 mm la capa inferior	9.4.1.	8.3.2
	• Compacte la capa inferior a través de su espesor sin golpear el fondo del molde	9.4.1.	8.1.2./8.3.2
	• Cuando se coloca la última capa se debe adicionar la cantidad de concreto necesario para que el molde quede lleno	9.4.1.	8.2.1
	• Si la varilla compactadora deja huecos, golpee los lados del molde con el mazo o la mano abierta después de cada capa	9.4.2.	8.3.2
	• Enrase el nivel del concreto con la parte superior del recipiente usando la varilla, si es necesario, afine con una llana o palustre	9.5.1.	8.4/8.4.1
•	Cubra el espécimen con una lámina no absorbente	Nota 6	9.1

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1620
QUITO

3 . ASENTAMIENTO

		ASTM C143 Numeral	NTC 396 Numeral
1.	Humedezca el cono y colóquelo sobre una superficie horizontal, rígida, plana, húmeda y no absorbente.	7.1.	6.1
2.	Ajuste el cono a la superficie colocando los pies en las dos agarraderas. No permita ningún movimiento durante el llenado	7.1.	6.1
3.	Llene el cono en tres capas de aproximadamente igual volumen, la primera a una profundidad de 67 mm, la segunda a una profundidad de 155 mm y la tercera hasta el tope del cono	Nota 5/7.2.	Nota 1/6.1
4.	Compacte cada capa con 25 golpes de la varilla de compactación distribuidos uniformemente en la sección transversal, a través de su profundidad	7.2.	6.2
5.	Compacte la segunda y tercera capa permitiendo que la varilla penetre ligeramente en la capa inferior	7.2.	6.2
6.	Cuando compacte la última capa, mantenga exceso de concreto por encima del tope del cono todo el tiempo	7.3.	6.3
7.	Enrase y alise la superficie de concreto usando la varilla de compactación apoyada sobre el tope del cono	7.3.	6.3
8.	Levante el molde en un solo movimiento suave hacia arriba, sin girarlo, en un tiempo de 5 ± 2 segundos	7.3.	6.3
9.	El ensayo debe realizarse en un tiempo máximo de 2 minutos y 30 segundos.	7.3.	6.3
10.	Mida con aproximación de 5 mm el asentamiento desde la parte superior del cono hasta el centro original desplazado de la muestra	7.4./8.1.	6.4/7.1

4. TEMPERATURA DEL CONCRETO

		ASTM C1064 Numeral	NTC 3357 Numeral
1.	1. Obtenga una muestra de concreto de acuerdo con la ASTM C 172 (NTC 454)		6.2.2
2.	Use un termómetro con precisión de ± 0,5 °C dentro de un rango de temperatura de 0 °C a 50 °C.	4.2	4.2
3.	Coloque el termómetro dentro de la muestra con un recubrimiento mínimo del sensor de 75 mm.	7.1.	7.1
4.	Presione suavemente el concreto alrededor del termómetro para que la temperatura ambiente no afecte la medición	7.1.	7.1
5.	Realice la lectura de la temperatura después de dos minutos o cuando la lectura se estabilice.	7.2.	7.2
6.	Complete la medición de la temperatura dentro de los 5 minutos siguientes a la obtención de la muestra.	7.3.	7.3
7.	Registre la temperatura con una aproximación de 0,5 °C.	8.1.	8.1

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR POTENTIOR EST SAPIENTIA FUNDADA EN 1620 QUITO

5. MASA UNITARIA Y RENDIMIENTO

		ASTM C138 Numeral	NTC 1926 Numeral
1.	Determine la masa del molde de medida desocupado		4.1
2.	Coloque el concreto en el molde de medida en tres capas de igual volumen compactadas por apisonamiento	6.3.	7.2
3.	Compacte cada capa con la varilla de compactación 25 veces en los moldes de 14 L o 50 veces en los moldes de 28 L	6.3.	7.2
4.	Compacte la capa inferior a través de su espesor sin golpear el fondo del molde	6.3.	7.2
5.	Compacte la capa intermedia y la superior, a través de su espesor, permitiendo que la varilla penetre aproximadamente 25 mm en la capa previa	6.3.	7.2
6.	Distribuya los golpes uniformemente sobre la sección transversal del molde por cada capa	6.3.	7.2
7.	Después de apisonar cada capa, golpee de 10 a 15 veces el molde con el mazo	6.3.	7.2
8.	Retire cualquier exceso de concreto con una llana o palustre, o adicione una pequeña cantidad de concreto para corregir la deficiencia después de la compactación de la última capa	6.5.	7.4
9.	Enrase el concreto proporcionando una superficie plana con el plato enrasador	6.6.	7.5
10.	Limpie los excesos de concreto y determine la masa del molde del recipiente totalmente lleno	6.7.	10
11.	Calcule la masa neta en kg	7.1.	8.1
12.	Calcule la masa unitaria en kg/m^3	7.1.	8.2

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1620
QUITO

6. CONTENIDO DE AIRE - MÉTODO DE PRESIÓN

		ASTM C231 Numeral	NTC 1032 Numeral
1.	Seleccione una muestra representativa de acuerdo con la ASTM C 172 (NTC 454).	7.1.	7.1
2.	Llene el recipiente en tres capas de igual volumen, dejando ligeramente alta la última capa	8.1.2.	8.1.2
3.	Compacte cada capa con 25 golpes de la varilla de compactación distribuidos uniformemente en la sección transversal, a través de su profundidad.	8.1.2.	8.1.2
4.	Compacte la capa inferior a través de su espesor sin golpear el fondo del molde.	8.1.2.	8.1.2
5.	Compacte la capa intermedia y la superior, a través de su espesor, permitiendo que la varilla de compactación penetre aproximadamente 25 mm en la capa previa.	8.1.2.	8.1.2
6.	Después de compactar cada capa, golpee de 10 a 15 veces el molde con el mazo.	8.1.2.	8.1.2
7.	Enrase y alise la superficie de concreto usando la varilla de compactación apoyada sobre el borde del recipiente.	8.1.4.	8.1.4
8.	Limpie completamente los bordes del recipiente y de la cubierta ensamblada, de tal forma que cuando la tapa se ajuste en su lugar, se obtenga un sello hermético.	8.2.1.	8.2.1
	Si utiliza medidor Tipo A, siga el procedimiento descrito hasta el numeral 8 y además:		
1.	Adicione agua sobre el concreto hasta que ésta ascienda cerca de la mitad de la escala	8.2.1.	8.2.1
2.	Use el fondo del recipiente como pivote y describa varios círculos completos con la parte superior de la columna y golpee ligeramente, al mismo tiempo, la tapa	8.2.1.	8.2.1
3.	Coloque nuevamente el recipiente en posición horizontal. Llene la columna ligeramente por encima de la marca del cero y golpee suavemente las paredes del recipiente.	8.2.1.	8.2.1
4.	Remueva la espuma, si es necesario, para identificar claramente el menisco.	8.2.1.	8.2.1
5.	Lleve el nivel de agua a la marca cero antes de cerrar el respiradero Aplique presión usando la bomba manual	8.2.1.	8.2.1
6.	Golpee suavemente los lados del medidor	8.2.3.	8.2.3
7.	Cuando el manómetro indique la presión de ensayo, registre el nivel de agua (h1)	8.2.3.	8.2.3
8.	Libere gradualmente la presión mientras golpea los lados del recipiente durante 1 min	8.2.3.	8.2.3
9.	Registre le nivel de agua (h2)	8.2.3.	8.2.3
10.	Calcule el contenido aparente de aire (A1= h1-h2)	8.2.3.	8.2.3

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FUNDADA EN 1620 QUITO

6. CONTENIDO DE AIRE - MÉTODO DE PRESIÓN

		ASTM C231 Numeral	NTC 1032 Numeral
	Repita el procedimiento, sin adicionar agua, para obtener una segunda lectura. Los dos resultados de contenido aparente de aire deben estar dentro del intervalo del 0,2 %	8.2.4	8.2.4
	Calcule el contenido de aire de la muestra con base en el promedio de estos dos valores, usando el factor de corrección	8.2.3/9.1	8.2.3/9.1
	Si utiliza medidor Tipo B, siga el procedimiento descrito hasta el numeral 8 y además:		
1.	Cierre la válvula de aire entre la cámara de aire y el recipiente de medida	8.3.1	8.3.1
2.	Abra los dos grifos de la cubierta	8.3.1	8.3.1
3.	Inyecte agua por un grifo hasta que salga por el otro	8.3.1	8.3.1
4.	Continúe inyectando agua dentro del grifo mientras somete el medidor a vibración suave para asegurar que todo el aire es expulsado	8.3.1	8.3.1
5.	Bombee aire hasta la línea inicial de presión	8.3.2	8.3.2
6.	Espere unos pocos segundos para que el aire comprimido se estabilice	8.3.2	8.3.2
7.	Ajuste el manómetro a la presión inicial	8.3.2	8.3.2
8.	Cierre los dos grifos	8.3.2	8.3.2
9.	Abra la válvula de aire entre la cámara de aire y el recipiente de medida	8.3.2	8.3.2
10.	Golpee los lados del recipiente de medida con un mazo	8.3.2	8.3.2
11.	Lea el porcentaje de aire después de golpear con la mano suavemente el manómetro	8.3.2	8.3.2
12.	Cierre la válvula principal y abra los grifos de la cubierta, antes de desta-parla	8.3.2	8.3.2
13.	Calcule el contenido de aire. Use el factor de corrección	9.1	9.1

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POSTERIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

7. CONTENIDO DE AIRE-MÉTODO VOLUMÉTRICO

		ASTM C173 Numeral	NTC 1028 Numeral
1.	Llene el recipiente en tres capas de igual volumen	7.1.	6.1
2.	Compacte cada capa 25 veces con la varilla de compactación	7.1.	6.1
3.	Después de apisonar cada capa, golpee de 10 a 15 veces el molde con el mazo	7.1.	6.1
4.	Enrase el nivel del concreto con la parte superior del recipiente usando la varilla	7.2.	6.2
5.	Ajuste la parte superior dentro del recipiente y adicione agua usando el embudo	7.3.	6.3
6.	Ajuste el nivel de agua usando una pera de caucho hasta que el fondo del menisco esté en la marca del cero	7.3.	6.3
7.	Enrosque la tapa	7.3.	6.3
8.	Invierta y agite la unidad hasta que el concreto se separe de la base	7.4.1.	6.4
9.	Gire y ruede la unidad con el cuello arriba para liberar el aire atrapado	7.4.2.	6.4
10.	Coloque el aparato derecho, sacúdalo y déjelo quieto hasta que el aire ascienda hasta la parte más alta	7.4.2.	6.4
11.	Repita los pasos 9 y 10 hasta que no se observen burbujas en la columna de agua		6.4
12.	Agregue alcohol isopropílico en incremento de una probeta hasta disipar la espuma	7.4.2.3	6.5
13.	Registre el nivel del líquido en el cuello con una aproximación de 0,1%	7.5	6.6
14.	Calcule el contenido de aire	8.1	7.1

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST SCIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

8. REFRENTADO UTILIZANDO MORTERO DE AZUFRE

		ASTM C617 Numeral	NTC 504 Numeral
1.	Revise que la temperatura del mortero de azufre esté a la temperatura adecuada y seco en el momento en que se coloque en el recipiente	6.2.4	6.2.3
2.	Asegúrese de que la placa y el equipo de refrentado estén a una temperatura adecuada antes de su uso	6.2.4	6.2.3
3.	Inspeccione la placa de refrentado para garantizar que no tenga abolladuras	4.1	3.1
4.	Aplique una capa delgada de aceite a la placa de refrentado	6.2.4	6.2.3
5.	Revuelva el mortero de azufre inmediatamente antes de vertir cada refrentado	6.2.4	6.2.3
6.	Asegúrese de que el espécimen esté lo suficientemente seco para evitar que se afecte el refrentado	6.2.4	6.2.3
7.	Adicione azufre derretido en el plato e inmediatamente alinee el cilindro, con el extremo limpio hacia abajo, sobre el plato utilizando las guías del refrentador	6.2.4	6.2.3
8.	Retire el cilindro del plato de refrentado y limpie el otro lado del espécimen	6.2.4	6.2.3
9.	Limpie nuevamente el plato de refrentado con aceite, y refrente el otro extremo del cilindro, revisando siempre que estén bien alineados	6.2.4	6.2.3
10.	Revise que el refrentado tenga una adecuada adhesión golpeando o raspando con un implemento metálico liviano	Nota 13	Nota 10
11.	Revise que el refrentado sea plano con una regla y con un calibrador	Nota 11	6.1.3/6.2.4
12.	Proteja el espécimen refrentado del secado cubriéndolo con una capa doble de lona húmeda o devolviéndolo al cuarto húmedo (no por más de 4 horas)	7.1	7.1
13.	Si el espécimen se almacena en un ambiente húmedo, las superficies refrentadas se deben proteger contra el goteo sobre sus superficies	7.1	7.1

9. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

		ASTM C231 Numeral	NTC 1032 Numeral
1.	El ensayo debe realizarse tan pronto como sea posible después de la remoción del sitio de curado	7.1.	7.1
2.	El espécimen se debe mantener húmedo, para ensayarlo en esta condición	7.2.	7.2
3.	Revise la perpendicularidad del eje del espécimen	6.2.	6.2
4.	Determine el diámetro hasta los 0,25 mm más cercanos promediando dos diámetros medidos en ángulos rectos el uno con respecto al otro cerca de la mitad de la altura del espécimen	6.2.	6.2
5.	Limpie las superficies de apoyo de los cojinetes de apoyo superior e inferior	7.4	7.4
6.	Coloque el espécimen de ensayo sobre el cojinete de apoyo inferior	7.4	7.4
7.	Alinee el eje del espécimen con el centro de carga del cojinete superior (con asiento esférico)	7.4	7.4
8.	Acerque el cojinete superior hasta que apoye suavemente sobre el espécimen mientras rota suavemente la porción movible con la mano para obtener contacto uniforme	7.4	7.4
9.	Aplique la carga continuamente sin golpear hasta que el espécimen se rompa (Velocidad = 1,3 mm/min para máquinas tipo tornillo o de 0,14 a 0,34 MPa/s para máquinas operadas hidráulicamente • No haga ajustes en la velocidad de movimiento de la plaqueta en ningún momento mientras el espécimen se esté deformando rápidamente inmediatamente antes de la falla	7.5.1/7.6 7.5.3	7.5/7.6 7.5.3
10.	Registre la carga máxima	7.6	7.6
11.	Anote el tipo de falla y la apariencia del concreto	9.1.6	8.5
12.	Calcule la resistencia a la compresión y repórtela con la precisión requerida	8.1/10	8.9/10

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR FUNDADA EN 1620 QUITO

10. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

		ASTM C78 Numeral	NTC 2871 Numeral
1.	Proteja el espécimen de la pérdida de humedad (numeral 9.3.2 de la norma NTC 550, o numeral 7.4 de la norma NTC 1377)		
2.	Gire el espécimen de ensayo sobre su lado con respecto a su posición de moldeo y céntrelo sobre los cojinetes de apoyo	6.2	5.1
3.	Centre el sistema de carga en relación con la fuerza aplicada	6.2	5.1
4.	Ponga en contacto los cojinetes aplicadores de la carga con la superficie del espécimen en los tercios entre los apoyos	6.2	5.1
5.	Revise el contacto sin carga entre el espécimen y los cojinetes y los apoyos de modo que no haya un hueco de más de 25 mm por 0,1 mm	6.2	5.1
6.	Si el hueco es de más de 0,1 mm, pero menor de 0,38 mm, se usan tiras de cuero extendidas a través del ancho total de los especímenes	6.2	5.2
7.	Cargue el espécimen hasta aproximadamente el 50% de la carga de falla	6.3	5.2
8.	Después, aplique la carga continuamente a una velocidad que aumenta continuamente el esfuerzo de la fibra extrema entre 862 y 1206 kPa	6.3	5.2
9.	Tome tres medidas a través de cada dimensión (una en cada borde y en el centro) con aproximación al 1,0 mm más cercano	7.1	6.1
10.	Registre el ancho promedio, la altura promedio y la localización de la falla	7.1	6.1

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1620
QUITO

DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO DE PESO NORMAL

Capítulo 11

Alcance

El conocimiento de las propiedades del concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido tiene como finalidad primordial la de determinar el diseño de la mezcla.

Para el proporcionamiento de los ingredientes de una mezcla de concreto se han sugerido muchos métodos dentro de los cuales se cuentan los analíticos, experimentales, semianalíticos y empíricos. Estos métodos han evolucionado desde los volumétricos arbitrarios (por ejemplo mezclas 1:2:4) de comienzos del presente siglo, al método de peso y volumen absoluto actual, propuesto por el ACI.

El método estudiado en el presente capítulo tiene como base los procedimientos del American Concrete Institute elaborado por el Comité ACI 211 y el de la Road Note Laboratory (RNL).

El método americano ACI es el más conocido y ampliamente usado. Se fundamenta en el principio básico de la relación agua/cemento desarrollado por Abrams. Consiste en seguir en forma ordenada una secuencia de pasos y determinar la cantidad de cada material en peso y en volumen, para $1m^3$ de concreto.

Sin embargo el método ACI ha sido concebido de tal manera que el proporcionamiento de los agregados se hace teniendo en cuenta que estos cumplan con las recomendaciones granulométricas de la norma ASTM C33; en consecuencia, se puede emplear el procedimiento alterno propuesto por la RNL de la Gran Bretaña, que consiste en hacer una optimización granulométrica.

La práctica sugerida no pretende profundizar los principios en que se basó el método sino mostrar los diferentes pasos que deben seguirse, aplicando los conceptos estudiados en los capítulos anteriores. Adicionalmente, es conveniente anotar que algunas tablas y gráficas utilizadas han sido extractadas de experiencias realizadas con materiales representativos del medio colombiano, pero el procedimiento base sigue siendo el del ACI.

Como aplicación del método se presentan dos ejemplos típicos. El primero muestra el procedimiento cuando los agregados cumplen con las especificaciones granulométricas y el segundo cuando hay que efectuarle una optimización a los agregados disponibles.

Conceptos básicos

El objetivo que se persigue en el diseño de las mezclas de concreto es determinar la combinación más práctica y económica de materiales disponibles para producir un concreto que satisfaga sus requerimientos bajo condiciones particulares de uso.

Una mezcla se debe diseñar tanto para estado fresco como para estado endurecido. Las principales exigencias que se deben cumplir para lograr una dosificación apropiada en estado fresco son las de maleabilidad y economía, y para concreto endurecido son las de resistencia, durabilidad, acabado y en algunos casos el peso volumétrico.

Por lo común, las propiedades del concreto fresco se rigen por el tipo de estructura a fundir (vigas, muros, zapatas, etc.) y por las técnicas de colocación y transporte (bomba, banda transportadora, carretilla, etc.); así mismo, las propiedades del concreto en estado endurecido se establecen para las características mecánicas y de durabilidad especificadas en el Diseño Estructural. En el primer caso, la resistencia específica a la compresión f'_c se involucra dentro del análisis estructural como un parámetro que determina el material, dependiendo del tipo de estructura que se vaya a crear. En el segundo caso, se trata de definir aspectos del concreto relacionados con la afectación por exposición ambiental.

El costo de la elaboración de una mezcla de concreto está constituido básicamente por el costo de los materiales, equipo y mano de obra. La variación en el costo de los materiales se debe a que el precio del cemento por kilo, es varias veces mayor que el de los agregados y de allí, que el proporcionamiento debe minimizar la cantidad de cemento sin sacrificar la resistencia y demás propiedades del concreto. La diferencia en costo entre los agregados generalmente es secundaria; sin embargo, en algunas localidades o con algún tipo de agregado especial pueden ser suficientes para que influya en la selección y dosificación. El costo del agua usualmente no tiene ninguna influencia, mientras que el de los aditivos puede ser importante por su efecto potencial en la dosificación del cemento y los agregados.

El costo de la mano de obra depende de la trabajabilidad de la mezcla y de los métodos de colocación y compactación. Una mezcla poco trabajable con un equipo de compactación deficiente aumenta los costos de mano de obra.

Datos previos

Antes de dosificar una mezcla de concreto además de conocer los datos de la obra o estructura que se va a construir y de las condiciones de transporte y colocación, también se deben conocer las propiedades de los materiales con los que se va a preparar la mezcla.

Datos de la obra

Los datos que se deben conocer de la obra son:

- Máxima relación agua/cemento
- Tamaño máximo nominal del agregado
- Asentamiento (consistencia) recomendado
- Mínimo contenido de cemento
- Dimensión mínima del elemento a construir
- Espaciamiento del acero de refuerzo
- Condiciones a que estará expuesta la estructura
- Resistencia a la compresión mínima necesaria por consideraciones estructurales
- Densidad mínima para pesas de gravedad y estructuras similares

Generalmente la totalidad de estos datos se obtiene de planos y especificaciones de la obra y la norma sismo resistente.

Datos de los materiales

De las propiedades de los materiales que se van a utilizar se debe conocer:

- Granulometría
- Módulo de finura de la arena
- Tamaño máximo de la grava
- Densidad aparente de la grava y de la arena
- Absorción de la grava y de la arena
- Masa unitaria compacta de la grava
- Humedad de los agregados inmediatamente antes de hacer las mezclas
- Densidad del cemento

Método de dosificación

Se puede apreciar que para el diseño de mezclas se recurre tanto a datos reales como a datos empíricos o de experiencia que con la ayuda de tablas, gráficas y ábacos, se obtiene una guía para alcanzar combinaciones óptimas de los materiales.

La optimización de las proporciones de la mezcla de concreto que cumpla con las características deseadas con los materiales disponibles, se logra mediante el sistema de ajuste y reajuste. Dicho sistema consiste en preparar una primera mezcla de prueba con unas proporciones iniciales calculadas por los métodos que se explican a continuación. A la mezcla de prueba se le efectúa el ensayo de asentamiento y si su valor es diferente del recomendado, se reajustan las cantidades. Cuando se logra el asentamiento requerido con las proporciones reajustadas, se elaboran muestras de cilindros a los que se les determine su resistencia a la compresión; se compara con la resistencia especificada 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 y la resistencia requerida; si por algún motivo no se cumple alguno de los requerimientos debido a peculiaridades que no se detectan con los ensayos corrientes que se efectúan a los materiales, se pueden hacer ajustes similares a los indicados hasta lograr los resultados deseados.

El método de dosificación se basa en la secuencia mostrada en la figura 11.1.

Elección de asentamiento

Los valores de asentamiento recomendados se muestran en la tabla 11.1.

Hay que tener en cuenta que los valores de asentamiento indicados, se usan cuando el método de compactación utilizado es la vibración. Cuando se empleen otros métodos diferentes a los datos de la tabla 11.1, se deben aumentar en 2,5 cm. Cuando el asentamiento no se encuentra especificado en la tabla mostrada, se puede adoptar un valor apropiado para la obra, recordando siempre que se deben usar mezclas con la mínima consistencia que permitan una colocación eficiente.

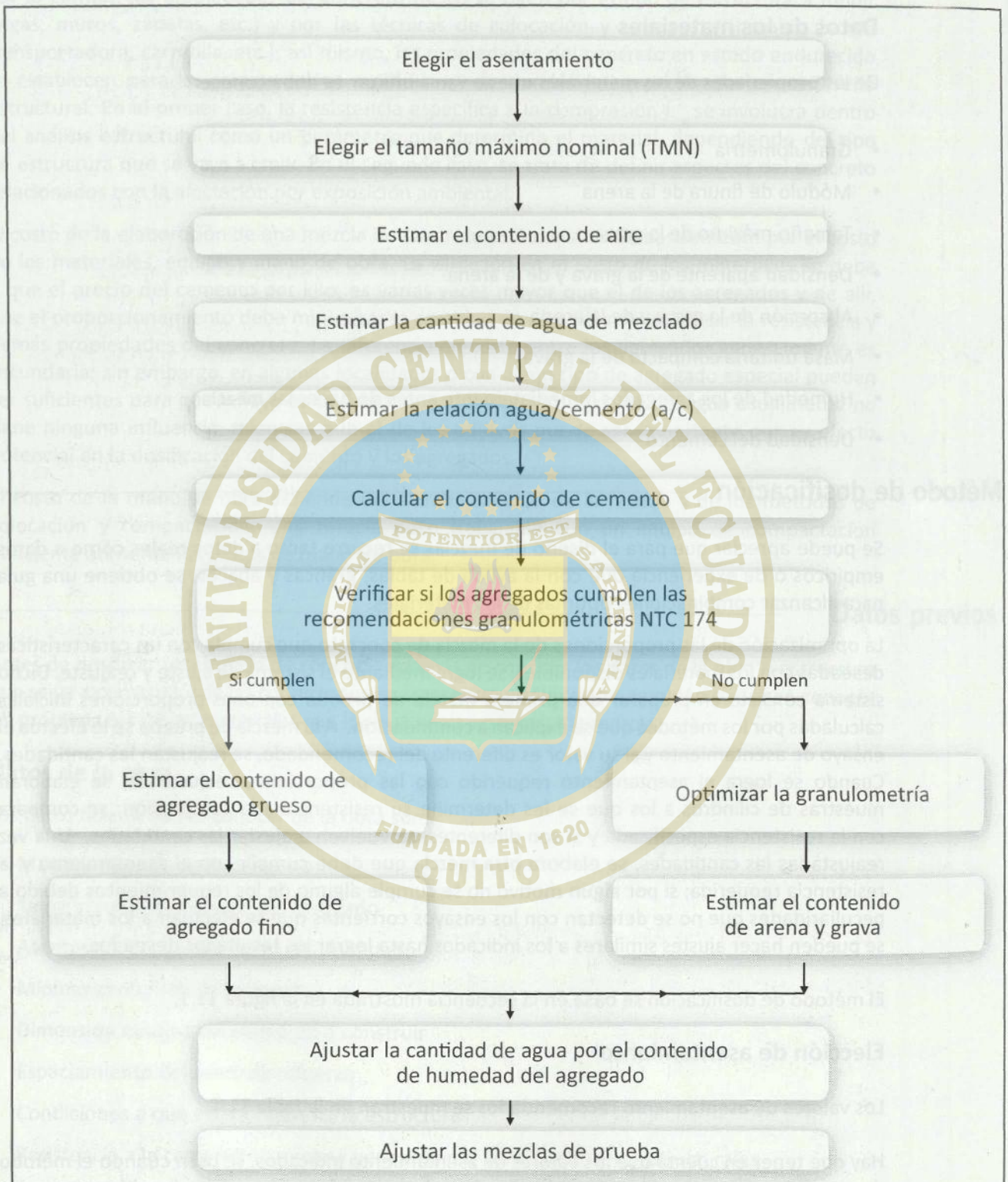


Figura 11.1. *Secuencia de pasos para la dosificación de mezclas.*

Tabla 11.1. Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción.

Asentamiento (cm)	Consistencia (Tipo de concreto)	Grado de Trabajabilidad	Tipo de estructura y condiciones de colocación
0 - 2,0	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibraciones de formaleta
2,0 - 3,5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados con máquina mecánica
3,5 - 5,0	Semi - seca	Pequeño	Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración Fundaciones en concreto simple Pavimentos con vibradores normales
5,0 - 10,0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados a a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración
10,0 - 15,0	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para compactarlo con demasiada vibración.

Elección del tamaño máximo nominal (TMN)

El TMN está limitado por las dimensiones de la estructura teniéndose presente que ningún caso debe exceder de un quinto la menor dimensión entre los lados de la formaleta, de un tercio el espesor de las losas, ni de las tres cuartas partes del espaciamiento libre entre varillas individuales de refuerzo, haces de varillas o cables pretensados. Estas restricciones se pueden evitar, si a juicio del ingeniero, la trabajabilidad y los métodos de compactación son tales que el concreto se puede colocar sin que se produzcan hormigueros o vacíos.

De otra parte, los 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 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.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

En la tabla 11.2., se muestran valores recomendados por la selección del TMN de acuerdo con el tipo de construcción y la dimensión mínima del elemento.

Tabla 11.2. *Valores recomendados de TMN según el tipo de construcción (11.6)*

Dimesión mínima del elemento (cm)	Tamaño máximo nominal en mm (pulgadas)			
	Muros reforzados, vigas y columnas	Muros sin refuerzos	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6 - 15	12 (½") - 19 (¾")	19 (¾")	19 (¾") - 25 (1")	19 (¾") - 38 (1½")
19 - 29	19 (¾") - 38 (1½")	38 (1½")	38 (1½") - 76 (3")	
30 - 74	38 (1½") - 76 (3")	76 (3")	38 (1½") - 76 (3")	76 (3")
75 ó más	38 (1½") - 76 (3")	152 (6")	38 (1½") - 76 (3")	76 (3") - 152 (6")

En algunas ocasiones la elección del TMN puede no estar limitada por la dimensión mínima del elemento a construir sino de otros factores como el equipo disponible para mezclar o el método de colocación del concreto que se requiera.

Las especificaciones del tipo de mezcladora que se dispone, son importantes ya que algunas (como las de descarga libre) están diseñadas para que trabajen en forma efectiva con partículas de grava con tamaño máximo hasta de 152 mm (6"); mientras que hay otras (como las de mezcla forzada) que su diseño generalmente solo permite mezclar concretos con agregado grueso cuyo TMN no exceda de 38,1 mm (1 ½"). Con respecto al método de colocación, el tener que bombear el concreto, utilizar 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 el TMN sea hasta el 40% del diámetro de la tubería cuando se trata de agregados de forma redondeada; y cuando se trata de partículas angulares, la limitación se hace a la tercera parte del diámetro. Esto tiene como fin evitar que la tubería se tape. De acuerdo con esto y teniendo en cuenta que los diámetros comerciales de las tuberías para bombear concreto más usadas son de 100 y 150 mm, se recomienda el uso de agregados cuyo TMN varíen entre 19 mm (¾") y 38,1 mm (1 ½").

Cuando la banda transportadora es el método de colocación empleado, el TMN está restringido al ángulo de inclinación de la banda. En efecto, entre más pequeño el ángulo de inclinación, se pueden utilizar partículas de agregado con TMN mayor y evitar así la segregación del concreto por efectos de la gravedad. El ACI 304 recomienda el transporte de la mezcla por este método con agregado grueso del TMN hasta de 100 mm (4").

Estimación del contenido de aire

Con el objeto de tener un mejor criterio acerca de la cantidad de aire en el concreto, en la tabla 11.3 se enseñan los valores que recomienda el ACI 318 S-08 para varios grados de exposición.

Tabla 11.3.Contenido aproximado de aire en el concreto para varios grados de exposición

Agregado Grueso		Porcentaje promedio aproximado de aire atrapado	Porcentaje promedio total de aire recomendado para los siguientes grados de expocisión		
Pulgadas	mm		Suave	Mediano	Severo
⅜	9,51	3,0	4,5	6,0	7,5
½	12,50	2,5	4,0	5,5	7,0
¾	19,10	2,0	3,5	5,0	6,0
1	25,40	1,5	3,0	4,5	6,0
1 ½	38,10	1,0	2,5	4,5	5,5
2	50,8	0,5	2,0	4,0	5,0
3	76,1	0,3	1,5	3,5	4,5
6	152,4	0,2	1,0	3,0	4,0

Es importante anotar que cuando se prevea que la estructura no estará expuesta a ambientes severos, la incorporación de aire incluido es notoriamente menor. El aire incluido beneficia la manejabilidad y la cohesión de la mezcla (Ver Tabla 11.3), con la mitad de los valores de contenido de aire que se recomienda para concretos con aire incluido.

Estimación de la cantidad de agua de mezclado (a)

Resumiendo algunos aspectos estudiados anteriormente, se puede anotar que la cantidad de agua por volumen unitario de concreto que se requiere para producir un asentamiento dado depende del tamaño máximo del agregado, la forma y textura de las partículas así como de la gradación de los agregados, de la cantidad de aire incluido y de los aditivos reductores de agua (cuando son utilizados).

Como se puede apreciar, son muchos los factores que intervienen para determinar este parámetro y de allí que su estimación exacta sea difícil. Sin embargo, se han desarrollado algunos estudios que tienen en cuenta algunos factores más importantes y que proporcionan valores que pueden ser mayores o menores a los requisitos reales del agua en la mezcla, pero que ofrecen suficiente aproximación para una primera mezcla de prueba.

Las diferencias de la demanda de agua no se reflejan necesariamente en la resistencia, puesto que pueden estar involucrados otros factores compensatorios. Tal es el caso de un agregado de forma angulosa y textura rugoso y otro de forma redondeada y textura lisa, ambos con la misma gradación y calidad. Para obtener una trabajabilidad determinada, se requiere un poco más de agua en las partículas angulares y rugosas que en las redondeadas y lisas, debido a que estas últimas se deslizan más fácilmente unas sobre otras (para una cantidad dada de cemento); sin embargo, las angulares y rugosas presentan una mayor adherencia con la pasta de cemento lo que hace que la posible disminución en la resistencia por mayor contenido de agua se compense con este factor.

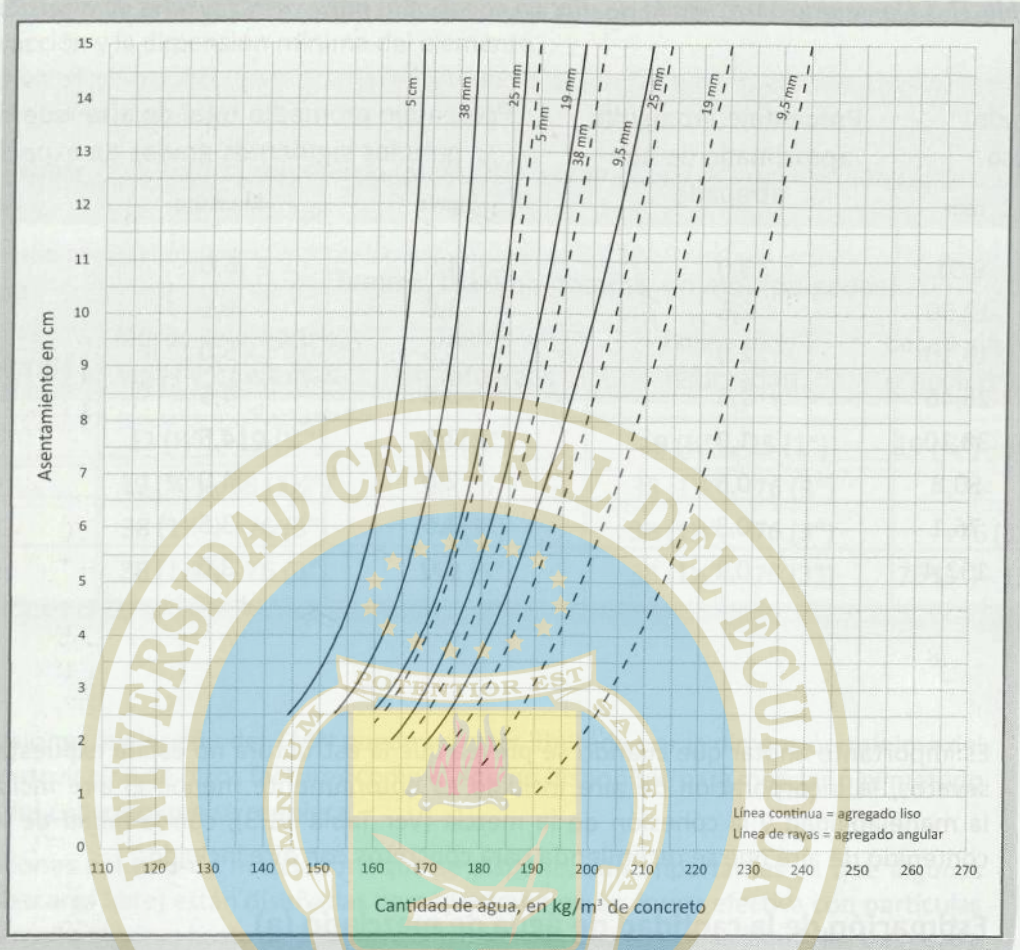


Figura 11.2. Requerimientos de agua de mezclado (11.7)

De la figura 11.2 se pueden obtener estimativos aproximados de la cantidad de agua de mezclado. Las curvas que aparecen están en función del TMN del agregado, del asentamiento deseado y de la forma y textura de las partículas de agregado.

Otro criterio es el suministrado par el ACI y mostrado en la tabla 11.4. Los valores allí indicados están en función del asentamiento, TMN de los agregados y del contenido de aire en la mezcla.

Es necesario hacer hincapié en que al valor encontrado bien sea por la figura 11.2. o por la tabla 11.4., hay que sumarle el agua de absorción de los agregados o restarle el agua libre de los mismos. Esto se debe a que la cantidad de agua calculada asume que los agregados son lisos y no absorbentes, o sea que están en la condición saturada y superficialmente seca (sss). De allí la importancia de medir el contenido de humedad de los agregados con la mayor exactitud posible inmediatamente antes de colocarlos en la mezcladora.

De otra parte, cuando se hacen mezclas de prueba para establecer relaciones de resistencia o para verificar la capacidad de producción de resistencia de una mezcla, se debe usar la combinación

menos favorable de agua de mezclado y contenido de aire. En otras palabras, se debe utilizar el máximo contenido de aire permitido o el que probablemente ocurra, y el concreto se debe calcular con el asentamiento más alto permisible. Con estas precauciones se evita que se haga una estimación demasiado optimista de la resistencia, bajo la suposición de que las condiciones promedio más que las extremas son las que predominan en el campo.

Tabla 11.4. *Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado (11.10)*

Condición del contenido de aire	Asentamiento cm	Agua en kg/m³ de concreto para los TMN del agregado indicados							
		10	12,5	20	25	40	50	70	150
		--	--	--	--	--	--**	--**	--**
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, por ciento	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 por ciento	8	7	6	5	4,5	4	3,5	3

* Estas cantidades de agua de mezclado deben utilizarse en los cálculos de los factores de cemento para mezclas de prueba. Son las máximas para agregados gruesos angulares razonablemente bien formados graduados dentro de los límites de las especificaciones aceptadas.

** Los valores de asentamiento para un concreto que contenga un agregado mayor de 40 mm están basados en pruebas de asentamiento efectuado después de remover las partículas mayores de 40 mm por medio de cribado húmedo.

Elección de la relación agua/cemento (a/c)

La relación agua/cemento, medida en peso, es uno de los factores más importantes en el diseño de mezclas de concreto y por lo tanto se le debe prestar mucha atención a su escogencia, la relación a/c requerida se determina básicamente por requisitos de resistencia, durabilidad, impermeabilidad y acabado.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIOR RATIO SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Puesto que los diferentes agregados y cementos producen generalmente resistencias distintas con la misma relación agua/cemento y además cuando no se le ejerce un control a la durabilidad, la selección de la relación a/c se debe hacer con base en el desarrollo de gráficas en donde se relacione la resistencia a la compresión y la relación agua/cemento, tal como se muestra en la figura 11.3. para un cemento Pórtland tipo I. En tales casos, si es posible, las pruebas se deben efectuar con los materiales que van a ser utilizados en la obra. Si por el contrario, los datos de las pruebas de laboratorio o registros de experiencia para llevar a cabo esta relación no pueden ser obtenidos por limitaciones de tiempo o por algún otro motivo, se pueden usar los de la tabla 11.5. o los de la figura 11.3. que aunque aproximados, son relativamente seguros para concretos elaborados con cemento Pórtland tipo I. Los valores tabulados y graficados deben cumplir las resistencias mostradas, las cuales están basadas bajo condiciones normalizadas de laboratorio.

De otro lado, cuando se prevean condiciones severas de exposición, la elección de la relación agua/cemento debe ser lo más baja posible, aún cuando los requisitos de resistencia puedan cumplirse con un valor más alto. En la tabla 11.6 se indican estos valores límites.

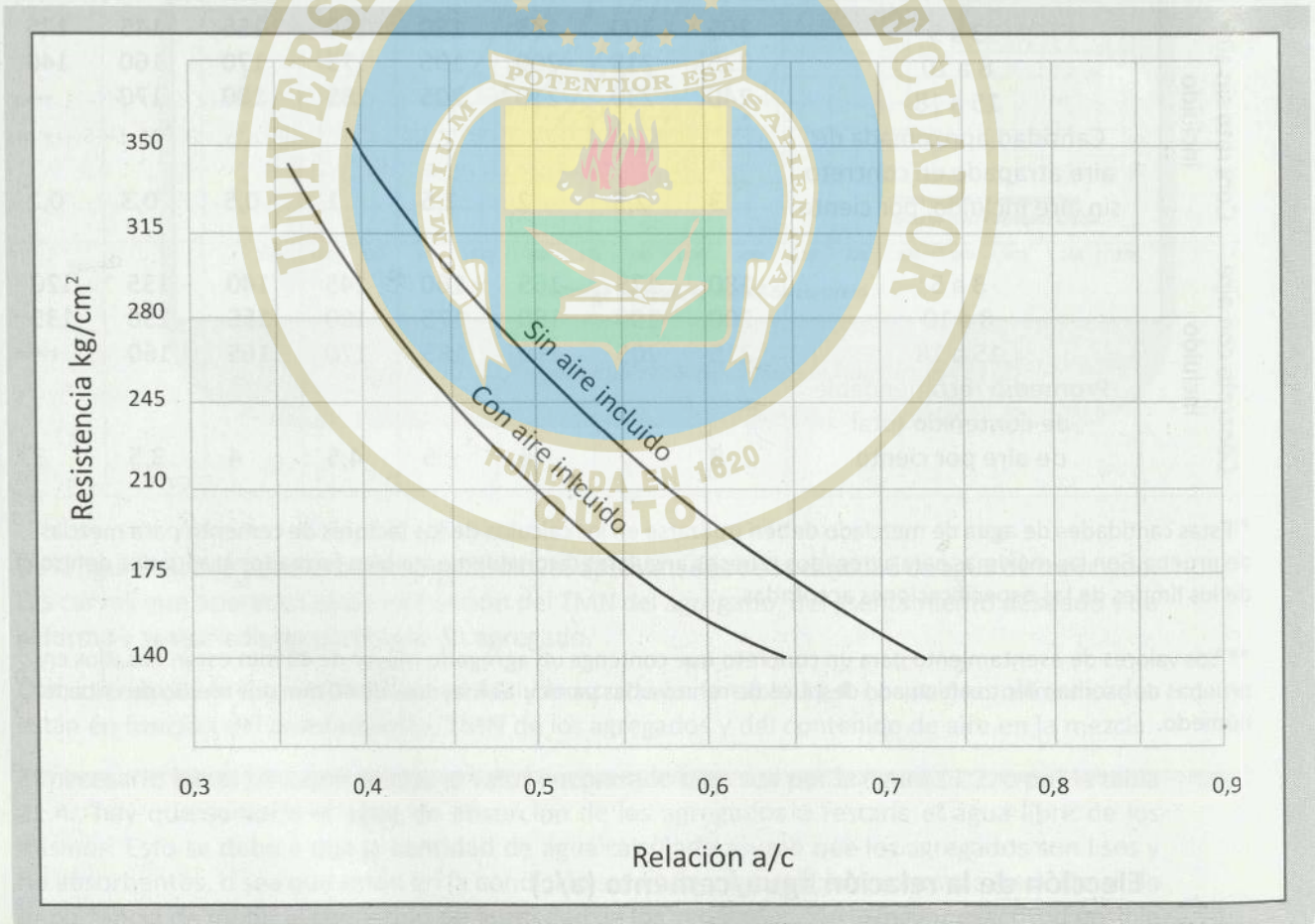


Figura 11.3. *Curvas de resistencia a la compresión vs. Relación agua/cemento*

Tabla 11.5. Relación entre la resistencia a la compresión y algunos valores de la relación a/c (11.3)

Resistencia a la compresión a los 28 días en kg/cm² (psi)	Concreto sin inclusor de aire Relación absoluta por peso	Concreto con inclusor de aire Relación absoluta por peso
175 (2 500)	0,65	0,56
210 (3 000)	0,58	0,50
245 (3 500)	0,52	0,46
280 (4 000)	0,47	0,42
315 (4 500)	0,43	0,38
350 (5 000)	0,40	0,35

Cálculo del contenido de cemento

El cálculo de la cantidad de cemento por metro cúbico de concreto es muy sencillo. Como ya se tienen la relación agua/cemento y el contenido de agua, calculados en los dos pasos inmediatamente anteriores se despeja el contenido de cemento (C). O sea,

$$C = \frac{a}{a/c} \qquad 11.1$$

Verificación de las especificaciones granulométricas

Un buen concreto fresco y endurecido depende en gran medida de la granulometría de los agregados. Por este motivo, antes de dosificar las cantidades de arena y grava es necesario verificar que su distribución de tamaños esté comprendida dentro de un rango preestablecido y no obtener proporciones de agrado grueso y fino, no convenientes.

La verificación se lleva a cabo bien sea elaborando una curva granulométrica de los agregados de que se dispone y compararla con la recomendada en la norma ASTM C33 (NTC 174), o bien tabulando. Dependiendo de si están o no dentro del rango granulométrico recomendado, la dosificación de grava y arena se puede lograr por uno de los métodos siguientes:

- **Método ACI:** Se utiliza cuando los agregados cumplen con las recomendaciones granulométricas ASTM C33.
- **Método de la Road Note Laboratory:** Se utiliza cuando los agregados no cumplen con las recomendaciones granulométricas.

Las recomendaciones granulométricas que da el ASTM en su capítulo C33 se indican en las tablas 11.7 y 11.8, para agregado grueso y fino respectivamente.

Tabla 11.6. Valores máximos de las relaciones a/c para diferentes tipos de construcción y grados de exposición (11.3)

Tipo de estructura	Condiciones de exposición		
	Número superior, clima severo, amplio margen de variación en la temperatura ++ Número inferior, clima suave, lluvioso o seco		
	Concreto en el agua o al alcance de niveles oscilantes de agua		
	En el aire	Agua dulce	Agua salada o en concreto con sulfatos +
Secciones delgadas, concreto ornamental , pilotes reforzados, tuberías, secciones con recubrimientos menores de 2,5 cm	0,49 0,53	0,44 0,49	0,40 0,40
Secciones moderadas como muros de contención, estribos, pilas, vigas	0,53 *	0,49 0,53	0,44 0,44
Partes exteriores de estructuras masivas	0,57 -	0,49 0,53	0,44 0,44
Concreto depositado o presión bajo de agua	- -	0,44 0,44	0,44 0,44
Losa sobre el piso	0,53 *	- -	- -
Concreto protegido contra la meteorización, inferior de edficios, concreto en el subsuelo	* *	- -	- -

++ Debe tratar de usarse aire incorporado.
* Las relaciones agua/cemento deben seleccionarse con base en los requisitos de resistencia.
\+ Para concentraciones de sulfatos mayores de 0,2% del suelo o del agua.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Tabla 11.7. Recomendaciones granulométricas para agregado grueso según ASTM C33 (NTC 174)

Agregado	Tamaño Normal mm	Material que pasa cada uno de los siguientes tamices (porcentaje)											
		101,60 mm 4"	90,50 mm 3 ½"	76,10 mm 3"	64,00 mm 2 ½"	50,80 mm 2"	38,10 mm 1 ½"	25,40 mm 1"	19,00 mm ¾"	12,70 mm ½"	9,51 mm ⅜"	4,76 mm No. 4	2,38 mm No. 8	1,19 mm No. 16
0	90,50 a 38,10	100	90 a 100		25 a 60		0 a 15		0 a 5					
1	64,00 a 38,10			100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5					
2	50,80 a 4,76				100	95 a 100		35 a 70		10 a 30		0 a 5		
3	38,10 a 4,76					100	95 a 100		35 a 70		10 a 30	0 a 5		
4	25,40 a 4,76						100	95 a 100		25 a 60		0 a 10	0 a 5	
5	19,00 a 4,76							100	90 a 100		20 a 55	0 a 10	0 a 5	
6	12,70 a 4,76								100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	
7	9,51 a 2,38									100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5
8	50,80 a 25,40				100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5				
9	38,10 a 19,00					100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5				

***Tabla 11.8.** Recomendaciones granulométricas para agregado fino según ASTM C33*

Tamiz		% Pasa	
mm	pulgadas	Límite inferior	Límite superior
9,51	⅜	100	100
4,76	No. 4	95	100
2,38	No. 8	80	100
1,19	No. 16	50	85
0,595	No. 30	25	60
0,297	No. 50	10	30
0,149	No. 100	2	10

- **Método ACI:**

Estimación del contenido de agregado grueso

El método ACI consiste en hallar el volumen de agregado grueso por metro cúbico de concreto. Se basa en el volumen unitario de concreto (m^3), expresado por la relación b/b_o, en donde b es el volumen de las partículas de agregado grueso por metro cúbico de concreto y b_o es el volumen de las partículas del agregado grueso por metro cúbico de agregado grueso.

De la referencia 11.15 se han extractado los valores b/b_o, en función del TMN y del módulo de finura de la arena (MF), los cuales se muestran en la tabla 11.9. Dichos valores se basan en agregados que cumplen con la granulometría recomendada por la norma ASTM C 33 (NTC 174). Por este motivo, el método sirve únicamente cuando la arena y la grava cumplen con este requerimiento.

Tabla 11.9. *Volumen de gravilla por unidad de volumen de concreto (b/b_o)*

Máximo tamaño nominal de agregados		Volumen de agregado grueso secado en el horno por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino			
		MÓDULO DE FINURA			
pulgadas	mm	2,40	2,60	2,80	3,00
⅜	9,51	0,50	0,48	0,46	0,44
½	12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
¾	19,1	0,66	0,64	0,62	0,60
1	25,4	0,71	0,69	0,67	0,65
1 ½	38,1	0,75	0,73	0,71	0,69
2	50,8	0,78	0,76	0,74	0,72
3	76,1	0,82	0,80	0,78	0,76
6	152,4	0,87	0,85	0,83	0,81

* Los volúmenes estan basados sobre agregados en condiciones de secado al horno descritos en ASTM C 29.

* Estos volúmenes son seleccionados de relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado para construcción usual reforzada.

El volumen de las partículas de agregados gruesos por metro cúbico de concreto se puede calcular multiplicando el valor de b/b_o, obtenido de la tabla 11.9, por el valor de b_o, (volumen de partículas de agregado grueso por metro cúbico de agregado grueso). El valor de b_o, se obtiene a partir de la masa unitaria compacta (MUC) y de la densidad aparente de la grava (dg), puesto que

$$b_o = \frac{MUC}{dg} \qquad 11.2$$

De tal manera que:

$$B = (b/b_o) \times b_o \qquad 11.3$$

Para obtener un concreto más manejable, como el que se requiere en unas ocasiones cuando se usa una bomba para la colocación o cuando se coloca el concreto en zonas muy congestionadas con acero de refuerzo o en estructuras de difícil compactación, se recomienda reducir hasta un 10% el contenido estimado de agregado grueso que se había determinado anteriormente. Sin embargo, se debe tener cuidado en que el asentamiento resultante, la relación agua/cemento y las propiedades de resistencia del concreto, sean compatibles con las recomendaciones proporcionadas anteriormente y que satisfagan los requerimientos aplicables en las especificaciones del proyecto.

Estimación del contenido de agregado fino

Una vez calculado el contenido de grava, se han estimado todos los ingredientes del concreto con excepción de la arena. Tal vez el método más exacto para calcular esta cantidad se basa en el uso de los volúmenes de los materiales; en cuyo caso, el volumen total de los ingredientes conocidos (agua, aire, cemento y agregado grueso) se resta del volumen requerido de arena.

Para facilitar el cálculo de las proporciones a medida que se van hallando los valores de cada uno de los ingredientes se va llenando un cuadro como el mostrado en la tabla 11.10.

Tabla 11.10. Proporciones de los materiales de la mezcla en peso y en volumen para 1 m³ de concreto

Material	Peso W (kg/m³)*	Densidad aparente (kg/m³)*	Volumen V (a³/m³)*
Agua	k/w	1000	Vw
Aire	0	0	Va
Cemento	Wc	dc	Vc
Agregado grueso	Wg	dg	Vg
Agregado fino	Wf	df	Vf
Total	Wt		1.00 m³

* El cociente m³ significa que está calculado para 1 m³ de concreto.

El procedimiento se basa en la definición de densidad (d).

$$d = \frac{\text{Peso de la masa}}{\text{Volumen}} \qquad 11.4$$

Como se conoce la densidad de los materiales (obtenidos en el laboratorio o por datos suministrados) y teniendo el peso o el volumen de los ingredientes por metro cúbico de concreto, se puede calcular el valor desconocido despejándolo en la ecuación 11.4 que está calculado para 1 m³ de concreto.

- **Método de la Road Note Laboratory (RNL)**

Optimización de la granulometría

Es muy común que ni la arena ni la grava de que se dispone para elaborar el concreto cumplan con la recomendación granulométrica. Sin embargo, se puede hacer una optimización mezclando la arena y la grava que se tienen en una proporción tal, que se puedan lograr relaciones agregado fino – agregado grueso convenientes. Para lograr esto, es necesario hacer uso de una especificación que involucre todo el agregado del concreto, desde las partículas más finas de la arena hasta las partículas más grandes de la grava.

Tal vez, la gradación más usada es la de Fuller y Thompson, cuya expresión matemática es:

$$p = 100\sqrt{\frac{d}{D}} \qquad 11.5$$

En la que p representa el porcentaje de materiales que pasa el tamiz de abertura d, de una masa de agregados cuyo tamaño máximo es D. Los valores de esta curva se presentan en la tabla 11.11.

Tabla 11.11. *Granulometría de Fuller y Thompson para los tamaños máximos mostrados*

Tamiz		D=50 mm (2")	D=38 mm (1 ½")	D=25 mm (1")	D=19 mm (¾")	D=12,5 mm (½")
pulgadas	mm					
2	50,8	100				
1 ½	38,1	87	100			
1	25,4	71	82	100		
¾	19,0	61	71	87	100	
½	12,5	50	58	71	82	100
⅜	9,5	43	50	61	71	87
No. 4	4,8	31	35	43	50	62
No. 8	2,4	22	25	31	35	44
No. 16	1,2	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

Sin embargo, las mezclas elaboradas con la granulometría de Fuller y Thompson tienden a ser muy ásperas debido a la deficiencia de arena, y cuando las mezclas son pobres, el problema se hace más notorio, especialmente para concretos con menos de 350 kg/m³ de cemento.

En vista del inconveniente anotado, se han desarrollado algunos ensayos con base en los estudios de Fuller y Thompson con el fin de encontrar un rango granulométrico que además de obtener adecuadas manejabilidades, sin segregación ni exudación, con el mínimo de huecos posibles, económica y que con la mayor densidad de empaquetado, proporcione altas resistencias a la compresión, se encontraron límites indicados en la tabla 11.12.

Tabla 11.12. *Rango granulométrico recomendado*

Tamiz		Límite de los porcentajes que pasan los siguientes tamaños máximos								
pulg	mm	90,6 mm (3½")	76,1 mm (3")	64,0 mm (2½")	50,8 mm (2")	38,1 mm (1½")	25,4 mm (1")	19,0 mm (¾")	12,7 mm (½")	9,51 mm (⅜")
3½	90,6	100								
3	76,1	94 91	100							
2½	64,0	89 83	94 91	100						
2	50,8	82 73	87 80	92 88	100					
1½	38,1	74 62	78 68	83 75	90 85	100				
1	25,4	64 50	68 55	72 60	78 68	87 80	100			
¾	19,0	58 42	62 47	65 51	71 58	78 68	90 85	100		
½	12,7	50 34	53 37	57 41	62 47	68 55	78 68	87 80	100	
⅜	9,51	45 29	48 32	51 35	56 40	62 47	71 58	78 68	90 85	100
No. 4	4,76	36 20	38 22	40 24	44 27	48 32	56 40	62 47	71 58	78 68
No. 8	2,36	28 13	30 15	32 16	34 18	38 22	44 27	48 32	55 40	61 46
No.16	1,18	22 9	23 10	25 11	27 13	30 15	34 18	38 22	44 27	48 32
No. 30	600µ	17 6	18 7	20 8	21 9	23 10	27 13	30 15	34 19	38 22
No. 50	300µ	14 4	14 4	15 5	17 8	18 7	21 9	23 10	27 13	30 15
No. 100	150µ	11 3	11 3	12 4	13 4	14 5	17 6	18 7	21 9	23 10

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1620
QUITO

Escogida la especificación granulométrica según el tamaño máximo, se optimiza la granulometría determinando cual es la mejor mezcla de arena y de grava para lograr un concreto de buenas propiedades de manejabilidad y resistencia para un contenido de cemento dado. Esto puede efectuarse por medio de cálculos o gráficamente utilizando el método de la Road Note Laboratory No. 4 (RNL).

En la práctica, el método más utilizado es el gráfico que consiste en lo siguiente:

- Se dibuja un cuadro de 10 divisiones en ordenadas y 10 divisiones en abscisas, tal como se aprecia en la figura 11.4.
- Se enumeran los ejes de las ordenadas de abajo hacia arriba de 0 a 100 y los ejes de las abscisas, el superior de 0 a 100 de izquierda a derecha y el inferior de derecha a izquierda, de este modo cualquier valor de arriba sumado al correspondiente valor de abajo da 100.
- Se escoge el eje superior como eje de porcentajes de arena y al inferior como eje de porcentajes de grava.

- Sobre el eje de las ordenadas correspondientes al 100% de la arena se coloca la granulometría de la arena y sobre el eje correspondiente al 100% de la grava se coloca la granulometría de dicho material.
- Se unen por medio de líneas rectas los puntos correspondientes a cada tamiz en las dos granulometrías. Se tienen entonces líneas inclinadas que representan los posibles porcentajes de mezcla de agregados que pueden pasar por cada uno de los tamices.
- Sobre las líneas inclinadas se colocan los puntos correspondientes a la especificación elegida.
- Se traza un eje vertical que separe los puntos hallados en igual cantidad a izquierda y derecha. A este eje le corresponde un porcentaje de arena y un porcentaje de grava que representa la mezcla óptima.

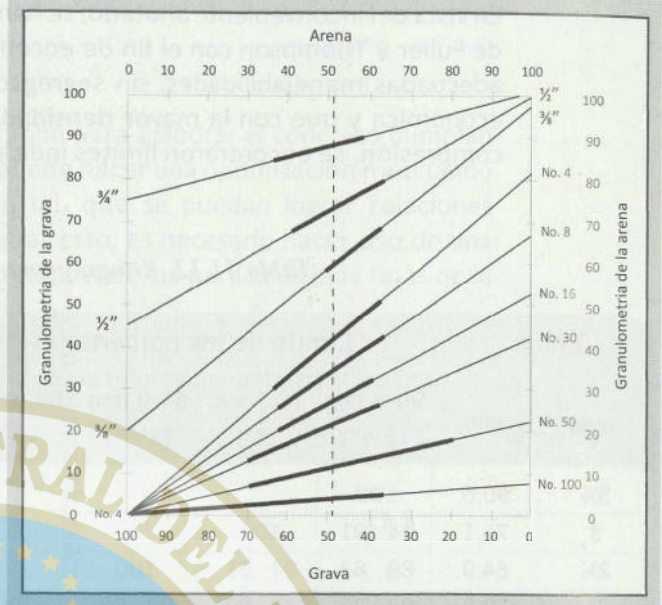


Figura 11.4. Optimización de las granulometrías de la tabla 11.14

El siguiente ejemplo ilustra el procedimiento:

En la tabla 11.13 se indican las granulometrías de dos agregados. Se desea saber cuál es la mezcla óptima para elaborar concreto.

Tabla 11.13. Ejemplo de optimización de granulometrías

Tamiz		Porcentajes que pasan		
milímetros	pulgadas	Grava	Arena	Material combinado
25,4	1	100		100
19,0	¾	77		88
12,7	½	44	100	72
9,51	⅜	19	99	61
4,76	No. 4	2	85	46
2,36	No. 8		68	37
1,18	No. 16		54	28
0,600	No. 30		43	23
0,300	No. 50		28	15
0,150	No. 100		9	4

La solución gráfica se enseña en la figura 11.4 de donde se tiene que la combinación óptima se encuentra proporcionando el 51% de arena y 49% de grava los valores correspondientes a cada tamiz del material combinado se muestra en la tabla 11.14, teniendo en cuenta que la especificación elegida corresponde a la relacionada en la tabla 11.13.

Tabla 11.14. Granulometría del agregado grueso del ejemplo 11.1

Tamiz		% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
milímetros	pulgadas			
50,8	2	0	0	100
38,1	1½	3	3	97
25,4	1	17	20	80
19,1	¾	20	40	60
12,5	½	30	70	30
9,51	⅜	10	80	20
4,76	No. 4	16	96	4
Fondo		4	100	0

Como se puede ver, la solución gráfica es muy sencilla y rápida. Es conveniente tener en cuenta algunos aspectos. En primer lugar las especificaciones de las normas están dadas en función del TMN, mientras que los estudios granulométricos que involucran todo el agregado están en función del TM, y de acuerdo con lo estudiado, estos dos valores algunas veces no coinciden. De allí que, al tener la granulometría de las masas de agregados a optimizar, se debe definir el TM y el TMN de la grava, que para el caso del ejemplo son iguales (TMN=TM=25,4 mm).

En segundo lugar, el método es muy aproximado, depende de la precisión de la gráfica y de la localización de la línea vertical. Por ello se recomienda efectuarlo con cuidado. Por último, vale la pena mencionar que la granulometría hallada cumple con las especificaciones.

De la misma manera como se aplica para dos masas de agregados, se puede utilizar para más de dos, combinando primero las porciones gruesas y la granulometría resultante se combina con la fracción fina.

Estimación del contenido de grava y arena

El contenido de grava y arena por metro cúbico de concreto se calcula en forma similar al método ACI. Como se tiene el volumen por metro cúbico de concreto del cemento, del agua y del aire, la suma de estos tres valores restándolos a 1 m^3, se obtiene el volumen de las partículas de agregado (grava + arena).

Conocido el volumen de agregados y calculada la densidad aparente promedio de los mismos, puede determinarse la masa de la grava y de la arena.

La densidad aparente promedio de agregados es un promedio ponderado con base en los porcentajes obtenidos del cuadro granulométrico; se calcula por medio de la expresión 11.6 u 11.7. La expresión 11.6 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, puede utilizarse la fórmula 11.7.

$$d\ prom = \frac{(dg) \times (df)}{(\%f) \times (dg) + (\%g) \times (df)} \qquad 11.6$$

$$d\ prom = (\%f) \times (df) + (\%g) \times (dg) \qquad 11.7$$

Siendo:

dg = Densidad aparente de la grava
df= 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

Con los datos anteriores se tienen ya la totalidad de los ingredientes de la mezcla para 1 m^3 de concreto. Para facilitar los cálculos se elabora un cuadro similar a la tabla 11.10. Teniéndose en cuenta que:

$$d\ prom = \frac{Wt}{Vt} \qquad 11.8$$

De donde
Wt = masa total de agregados por m^3 de concreto.
Vt = volumen total de agregados por m^3 de concreto.
O sea que: (d prom) x (Vt) = Wt.

De otra parte se sabe que Wg = (Wt) x (%g), de donde se tiene que la masa de la grava (Wg) será:

$$Wg = (d\ prom) \times (Vt) \times (\%g) \qquad 11.9$$

y por consiguiente la de la arena (Wf), será:

$$Wf = (d\ prom) \times (Vt) \times (\%f) \qquad 11.10$$

De manera tal que queda completo el cuadro.

Un cálculo más preciso se logra de la siguiente manera: conocida la masa total de agregados (Mt) y como se puede calcular el peso retenido en cada tamiz (a partir de los porcentajes que pasan), entonces se puede calcular las proporciones requeridas de cada tamaño específico.

Ajuste de la cantidad de agua de mezclado debido a la humedad de los agregados

Las partículas de agregado, debido a la porosidad de los granos, siempre tendrán algún grado de humedad, recordándose que el secado total se logra únicamente mediante un horno a 110°C las 24 horas. De otra parte la estimación de la cantidad de agua de mezclado, se hizo tomando como base que los agregados están en condición sss (saturada superficialmente seca), lo cual no se logra sino en el laboratorio.

En consecuencia, con respecto a la condición sss, siempre tendrá un exceso de agua (agua libre) o un defecto, cantidad que no es independiente del agua de mezclado y por lo tanto se le debe restar la cantidad de exceso o sumar la cantidad en defecto.

Para determinar el sobrante o faltante de agua se puede utilizar la siguiente expresión propuesta por el Ingeniero Diego Sánchez:

$$A = M(H \pm Abs) \qquad 11.11$$

De donde
A = Agua en exceso o defecto respecto a la condición sss
M= Peso de la muestra seca, en kg
H= Humedad del agregado en tanto por uno
Abs= Absorción del agregado en tanto por uno

La humedad se determina con la siguiente fórmula:

$$H = \frac{M_h - M}{M} \qquad 11.12$$

Donde:
H= Humedad de la muestra en tanto por uno
Mh= Peso de la muestra húmeda en gramos
M= Peso de la muestra seca, en gramos

El cálculo de la absorción se puede lograr mediante la expresión:

$$Abs. = \frac{Msss - M}{M} \qquad 11.13$$

Donde:
Abs = Absorción de la muestra en tanto por uno
M = Peso seco de la muestra, en gramos
Msss = Peso de la muestra en estado sss, en gramos

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1620
QUITO

Cuando la humedad es mayor que la absorción, indica que el agregado tiene agua en exceso y está aportando agua a la mezcla, de tal forma que hay que restarle agua a la mezcla y por lo tanto se debe usar el signo menos (-). Por el contrario, cuando la absorción es mayor que la humedad indica que el agregado necesita más agua para llegar a la condición sss, entonces hay que agregarle agua a la mezcla puesto que hay defecto de esta, por lo tanto hay que usar el signo positivo (+).

Como el material húmedo pesa más que el seco, la corrección de peso seco a húmedo se realiza por medio de la expresión 11.14.

$$M_h = M(1 + H) \qquad 11.14$$

Ajustes a las mezclas de prueba

El diseño explicado anteriormente para calcular las proporciones de los diferentes materiales que componen el concreto, permite conocer unas cantidades que teóricamente producen un concreto con las propiedades deseadas. Sin embargo, existen algunos factores de los materiales que nos detectan en los ensayos y que traen como consecuencia un concreto con propiedades algo diferentes a las esperadas. Por esto es necesario comprobar las cantidades teóricas por medio de mezclas de prueba.

La mezcla de prueba se debe efectuar de acuerdo con la norma ASTM C31. A dicha mezcla se le verifica el peso unitario y el rendimiento volumétrico del concreto (norma ASTM C138) así como el contenido de aire (ASTM C173 y C231). También se debe observar que el concreto tenga la trabajabilidad y el acabado adecuado y que no se presente exudación ni segregación. De acuerdo a ello, se pueden llevar a cabo los ajustes pertinentes con las proporciones de las mezclas subsecuentes siguiendo el procedimiento sugerido por el ACI y que se indica a continuación:

a. Se estima de nuevo la cantidad de agua de mezclado necesaria por metro cúbico de concreto, dividiendo el contenido neto de agua de mezclado de la mezcla de prueba entre el rendimiento de la mezcla de prueba en metros cúbicos. Si el asentamiento de la mezcla de prueba no fue el correcto, se aumenta o se disminuye la cantidad reestimada de agua en 2 kg por cada centímetro de aumento o disminución del asentamiento requerido.

b. Si el contenido de aire que se obtuvo no es el deseado (para concreto con aire incluido), se estima nuevamente el contenido de aditivo requerido para el contenido adecuado de aire, y se aumenta o se reduce el contenido de agua indicado en el párrafo (a) en 3 kg/m^3 por cada 1% de contenido de aire que deba disminuirse o aumentarse en la mezcla de prueba previa.

c. Se calculan los nuevos pesos de la mezcla partiendo de la elección de la relación agua/cemento. Si es necesario, se modifica el volumen de agregado grueso mostrado en la tabla 11.9 con el objeto de lograr una trabajabilidad adecuada.

- **Cálculo del peso unitario rendimiento volumétrico**

El peso unitario del concreto consiste en determinar el volumen del concreto producido a partir de una mezcla de cantidades conocidas de los materiales componentes con el fin de verificar la

correcta dosificación y rendimiento de los materiales. El peso unitario se determina por medio de la expresión 11.15 y el rendimiento volumétrico por la 11.16.

$$W = (Wmat. + recip - Wrecip) / Vrecip\ (kg/m^3) \quad 11.15$$

Donde
W = peso unitario del concreto
Wmat + recip = peso de la mezcla fresca + peso del recipiente de medida
Wrecip = peso del recipiente de medida
V = Volumen del recipiente de medida

$$Y = W_1 / W\ (m^3) \quad 11.16$$

Donde:
Y= Volumen de concreto producido por dosificación (rendimiento volumétrico)
W = Peso unitario del concreto
W_1 = Peso total de todo el material dosificado (Wagreg + Wcemento + Wagua)

Ejemplos de aplicación

Ejemplo 11.1 Teórico

- **Datos generales de la obra**

Se está construyendo una carretera en la que se requiere fundir muros de contención reforzados. Los estudios indican que la estructura no estará expuesta a intemperismo ni a condiciones agresivas. El diseño estructural exige una resistencia a la compresión a los 28 días de 28MPa (4061 psi). El diseño del elemento en lo que se refiere al espaciamiento de acero de refuerzo y la dimensión mínima del elemento, obligan a que el TMN sea de 38.1 mm (1 ½).

- **Datos de los materiales**

De los materiales disponibles para elaborar el concreto se conoce:

Del agregado grueso

Granulometría: El ensayo granulométrico muestra los valores enseñados en la tabla 11.14

De donde se tiene que: TM = 50.8 mm (2") y TMN = 38.1 mm (1 ½")

Masas unitarias
Masa unitaria compacta: MUC = 1560 kg/m^3
Masa unitaria suelta: MUS = 1540 kg/m^3

Densidad aparente: 2470 kg/ m^3

Absorción: Abs.g = 2.5%

Humedad natural: Hg = 4%

Origen aluvial: Textura lisa y forma redondeada

De la arena

Granulometría: El ensayo granulométrico muestra los valores enseñados en la tabla 11.15

MF = (98 + 85 + 70 + 40 + 10 + 2)/100

De donde se tiene que: MF=3.05

Masas unitarias:

Masa unitaria suelta MUS= 1460 kg/m^3

Masa unitarias compacta MUC= 1590 kg/m^3

Densidad aparente: 2540 kg/m^3

Absorción: Abs.f 1.3%

Porcentaje de arcilla: 1.4%

Ensayo calorimétrico: No. 2

Humedad natural Hf: 8%

Origen aluvial: Textura lisa de forma redondeada.
No se requiere el uso de aditivos, el agua a utilizar es del acueducto y el tipo de cemento es Pórtland tipo I con una densidad de 3,10 g/m^3 (3100 kg/m^3)

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Tabla 11.15. *Granulometrías del agregado fino del ejemplo 11.1*

Tamiz		% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
milímetros	pulgadas			
9,51	⅜	0	0	100
4,76	No. 4	2	2	98
2,38	No. 8	8	10	90
1,19	No. 16	30	40	60
595	No. 30	30	70	30
297	No. 50	15	85	15
149	No. 100	13	98	2
Fondo		2	100	0

- **Procedimiento de dosificación**

Elección del asentamiento

Con base en la tabla 11.1 se puede elegir el rango de asentamiento entre 5 y 10 cm. Como se trata de un elemento esbelto (no es un muro de gravedad), se requiere de un grado de trabajabilidad medio con tendencia a ser alto, de tal manera que se puede adoptar un asentamiento de 10 cm.

Elección del tamaño máximo nominal TMN

El TMN, limitado por las dimensiones de la estructura, está estipulado en 1½" (38,1 mm). De acuerdo con la granulometría de la grava de que se dispone se aprecia que cumple con este requisito. En el caso de que fuera mayor habrá que hacer una redistribución del material.

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. En cuanto a la estimación de la cantidad de aire atrapado, de la tabla 11.3. para un TMN de 38,1 mm (1½"), se tiene una cantidad aproximada de 1,0%, o sea de 10 litros (0,01 m^3).

Estimación de la cantidad de agua de mezclado (a)

Para un TMN de 38,1 mm (1½"), agregados de forma redondeada y textura lisa, asentamiento de 10 cm y concreto sin aire inducido, se tiene: de la figura 11.2., 171 l y de la tabla 11.4., 175 litros. Se adopta este último valor (0,175 m^3).

Elección de la Relación agua/cemento (a/c)

La elección de la relación agua/cemento depende básicamente de la resistencia y la durabilidad. No se prevén condiciones de exposición y por inconvenientes de tiempo no se pueden obtener curvas de resistencia vs relaciones agua/cemento (como se recomienda). Por estas razones se utilizan los valores mostrados en la tabla 11.5 de donde se consigue para una resistencia de 280 kg/cm^2 y para concreto sin aire incluido, una relación agua/cemento de 0,47.

Cálculo del contenido de cemento

Con la relación agua/cemento (en peso) elegida y la cantidad de agua, se logra la cantidad (en peso) de cemento por metro cúbico de concreto.

$r = \frac{a}{c}$, ^{r} = 0,47, a = 175 kg/m₃, entonces

$$c = \frac{175\ kg/m^3}{0,47} = 372\ kg/m_3$$

El volumen de cemento por metro cúbico de concreto será:

$$Vc = \frac{372\ \ kg/m^3}{3100\ \ kg/m^3} = 0,120\ m_3/m_3$$

Verificación de las especificaciones granulométricas

Puesto que los agregados cumplen con las especificaciones granulométricas, se utiliza el método ACI 211 para dosificar la arena y la grava.

Tabla 11.16. *Verificación granulométrica del ejemplo 11.1*

Tamiz pulgadas	% Pasa			
	Límite inferior	Granulometría a comparar	Límite superior	Verificación
		Grava		
2	100	100	100	o.k
1½	95	97	100	o.k
1	-	90	-	-
¾	35	60	70	o.k
½	-	30	-	-
⅜	10	20	30	o.k
No. 4	0	4	5	o.k
		Arena		
⅜	100	100	100	o.k
No. 4	95	98	100	o.k
No. 8	80	90	100	o.k
No. 16	50	60	85	o.k
No. 30	25	30	60	o.k
No. 50	10	15	30	o.k
No. 100	2	2	10	o.k

Estimación del contenido de grava

Para un módulo de finura de la arena de 3,05 y un TMN de 38,1 mm (1½"), se obtiene de la tabla 11.9. un valor de b/b_o de 0,70.

De la fórmula 11.2. se tiene que:

$$b_{o'} = \frac{MUC}{dg} = \frac{1560 \ kg/m^3}{2470 \ kg/m^3} = 0,632$$

Por lo que el volumen de grava por metro cúbico de concreto (b), será:

$$B = \frac{b \times b_{o'}}{b_o} = 0,69 \times 0,632 = 0,436 \ m_3 / m_3$$

Estimación del contenido de arena

El volumen de arena será el complemento de la suma del volumen de los ingredientes ya encontrados para un metro cúbico
O sea,

El volumen de arena (VA)

$VA = 1 - (0,010 + 0,175 + 0,120 + 0,436) = 0,259 m^3/m^3$.

Las cantidades en peso y en volumen por metro cúbico de concreto se presentan en forma ordenada en la tabla 11.17.

Tabla 11.17. *Cantidades para 1 m³ de la mezcla del ejemplo 11.1*

Material	Peso W_1 kg/m³	Densidad D_1 kg/m³	Volumen V_1 m³/m³	Ajustes por humedad W_1 kg/m³
Cemento	372	3100	0,120	372
Aire	0	0	0,010	0
Agua	175	1000	0,175	114,75
Grava	1077	2470	0,436	1120
Arena	658	2540	0,259	710
Total	2282 kg/m³		1,00 m³	

Pesos húmedos de los agregados

Empleando la fórmula 11.14, se tiene:

Peso húmedo de la grava:
$Mhg = 1077(1 + 0,04) = 1120 kg/m^3$

Agua en exceso o en defecto para la grava
Hg = 0,04
Abs.g = 0,025

Como la humedad es mayor que la absorción entonces la grava tiene agua en exceso o agua libre. Empleando la fórmula 11.11 se tiene,

Ag = 1077 (0,04 - 0,025) = 16,16 kg
Para la arena:
Hf = 0,08
Abs.f = 0,013

Peso húmedo de la arena:
Mha = 658(1 + 0,08) = 711 kg/m³

También tiene agua en exceso.

Af = 658 (0,08-0,013) = 44,09 kg
Agua total en exceso (A):
A = Ag + Af
= 16,16 + 44,09 = 60,25 kg

De tal manera que la cantidad de agua de mezclado será:
175 - 60,25 = 114,75 kg/m^3

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, entonces se debe hacer el respectivo ajuste.

Ajuste de agua de mezclado

La mezcla de prueba se elaboró con 20 litros (0,20 m^3) de tal forma que la cantidad en peso de los ingredientes fue de:

Agua (añadida)	2,30 kg
Cemento	7,44 kg
Grava (húmeda)	22,40 kg
Arena (húmeda)	14,20 kg

Peso del material dosificado (W) 46,34 kg.

En el cálculo del peso unitario del concreto fresco (expresión 11.15) se obtuvo un valor de 2380 kg/m^3.

Puesto que el rendimiento de la mezcla de prueba fue de:

$$Y = \frac{46,34}{2380} = 0,0195 \text{ m}^3 \text{ (Expresión 11.16)}$$

Y en el contenido neto de agua de mezclado de la mezcla de prueba fue de:

2,30	(agua añadida)
+16,16 x 0,02 kg	(por agua libre en la grava)
+60,25 x 0,02 kg	(por agua libre en la arena)
3,83 kg	

La cantidad neta de agua de mezclado que se requiere para un metro cúbico de concreto con el mismo asentamiento de la mezcla de prueba debe ser:

$$\frac{3,83}{0,0195} = 196,4 \text{ kg/m}^3.$$

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 4 kg de agua, o sea que requiere de una cantidad total de agua de mezclado de 196,4 + 4 = 200,4 ≈ 200 kg/m^3.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Ajuste de la cantidad de cemento

Al aumentar el agua de mezclado es necesario agregar cemento adicional para mantener constante la relación agua/cemento deseado de 0,47. La cantidad de cemento reajustado es de:

$$\frac{200}{0.47} = 426 \text{ kg/m}^3$$

Ajuste de la cantidad de grava

Debido a que se ha encontrado satisfactoria la trabajabilidad, se pudo conservar la cantidad de grava por volumen unitario de concreto utilizado en la mezcla de prueba. Así pues, la cantidad de grava por metro cúbico es de:

$$\frac{22,40}{0.0195} = 1149 \text{ kg/m}^3 \text{ (húmeda)}$$

La cantidad de peso seco es de:

$$\frac{1149}{1.04} = 1105 \text{ kg/m}^3$$

Y la cantidad de peso sss es:

$1.105 \times 1,025 = 1133 \text{ kg/m}^3$ (sss)

Ajuste de la cantidad de arena

La cantidad requerida de arena se determina por diferencia de pesos. Puesto que se conoce el peso volumétrico del concreto y los pesos del cemento, del agua y de la grava.

Peso volumétrico del concreto	2380 kg/m³
Peso del cemento	426 kg/m³
Peso del agua	200 kg/m³
Peso de la grava (sss)	1133 kg/m³

De tal forma que la cantidad de arena es, por tanto:

$2380 - (426 + 200 + 1133) = 621 \text{ kg (sss)}$

En peso seco es:

$$\frac{621}{1,08} = 575 \text{ kg /m}^3$$

Los pesos de la mezcla por metro cúbico de concreto son:

Agua neta de mezclado	200 kg /m³
Cemento	426 kg /m³
Grava (seca)	1133 kg /m³
Arena (seca)	575 kg /m³

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR SIB - UCE

Ejemplo 11.2. gráfico

Se necesita elaborar concreto para construir las columnas de un puente que estarán expuestas al agua dulce en un clima severo. El diseño estructural especifica una resistencia a la compresión a los 28 días de 21MPa (3000psi). Las condiciones de colocación permiten el uso de agregado grande, pero se utilizará el único de calidad satisfactoria y económicamente disponible.

- **Datos de los materiales**

Granulometría (Ver tabla 11.18).

	Grava	Arena
Densidad		
Aparente (kg/m^3)	2420	2590
Masa unitaria		
Compacta MUC (kg/m^3)	1620	1650
Forma Angular		
Humedad	3%	5%
Absorción	2%	1%

*Humedad libre = humedad - absorción

Del cemento

Se utilizará cemento Pórtland tipo I, que tiene una densidad de 3,10 g/cm^3, (3100 kg/m^3).

Del agua

Se empleará agua del acueducto de la localidad.

Tabla 11.18 Granulometría de los agregados del ejemplo 11.2

Tamiz		% Pasa	
milímetros	pulgadas	Grava	Arena
25,4	1	100	
19,0	¾	95	
12,7	½	70	
9,51	⅜	40	100
4,76	No. 4	12	78
2,38	No. 8		65
1,19	No. 16		45
0,60	No. 30		35
0,30	No. 50		25
0,15	No. 100		15

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

- **Procedimiento de dosificación**

Elección del asentamiento

Las condiciones de colocación y el tipo de estructura permiten un asentamiento entre 3,5 y 5,0 cm. Para obtener una mezcla con una adecuada trabajabilidad y que no presente problemas a la compactación se adoptará un asentamiento de 5 cm.

Elección del TMN

El TMN disponible es de 19 mm (3/4").

Estimación del contenido de aire

Puesto que la estructura estará expuesta a ambientes severos, se empleará un aditivo inclusor de aire. De la tabla 11.3, para un TMN de 19 mm (3/4") y un grado de exposición severo, se tiene promedio total de aire de 6%, de los cuales aproximadamente el 2% es aire naturalmente atrapado.

Estimación de la cantidad de agua de mezclado

Como se trata de una mezcla con aire incluido, la cantidad de agua se puede estimar de la tabla 11.4; se obtiene luego, una cantidad de 165 kg/m³ para un TMN de 19 mm y un asentamiento de 3 a 5 cm.

Elección de la relación agua/cemento

De acuerdo con la tabla 11.5, la relación agua/cemento necesaria para producir una resistencia de 21 Mpa (3.000 psi) en un concreto con aire incluido, se estima aproximadamente en 0,5. Sin embargo la tabla 11.6, para estructuras en agua dulce y en clima severo, indica que la relación agua/cemento no deberá exceder de 0,44. El valor que se utilizará para los cálculos será este último (0,44).

Cálculos del contenido de cemento

Conocidas la relación agua /cemento y la cantidad de agua de mezclado, el contenido requerido de cemento será de:

$$C = \frac{165}{0,44} = 375 \text{ kg/m}^3$$

Y el volumen que ocupará esta masa de cemento será

$$Vc = \frac{375}{3100} = 0,121 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

Verificación de las especificaciones granulométricas

Como se puede apreciar en la tabla 11.19, algunos de los tamaños no cumplen con los requisitos granulométricos NTC 174. Por esta razón se debe optimizar la granulometría por medio del método expuesto anteriormente (Ver figura 11.5).

Tabla 11.19 Verificación especificaciones granulométricas del ejemplo 11.2

Tamiz pulgadas	% Pasa			
	Límite inferior	Granulometría a comparar	Límite superior	Verificación
Grava				
1	100	100	100	o.k
¾	90	95	100	o.k
½	-	70	-	-
⅜	20	40	55	o.k
No. 4	0	12	5	No
Arena				
⅜	100	100	100	o.k
No. 4	95	78	100	No
No. 8	80	65	100	No
No. 16	50	45	85	No
No. 30	25	35	60	o.k
No. 50	10	25	30	o.k
No. 100	2	15	10	No

De acuerdo con lo anterior, la mezcla óptima estará compuesta 55% de arena y 45% de grava con la distribución de tamices mostrada en la tabla 11.20.

El volumen de agregados por metro cúbico en concreto será de:

$$V_{agrega} = 1 - (0{,}06 + 0{,}165 + 0{,}121) = 0{,}654\ m^3/m^3$$

Para calcular los pesos secos respectivos se debe conocer la densidad aparente promedio. Como la densidad aparente de la grava (d_g = 2420 kg/m³) difiere muy poco de la densidad de la arena (d_f = 2590 kg/m³) se puede emplear la expresión 11.17.

$$D_{prom} = 0{,}55 \times 2590 + 0{,}45 \times 2420 = 2514\ kg/m^3$$

Empleando las expresiones 11.9 y 11.10 respectivamente, se obtiene que los pesos secos de la grava y de la arena serán de:

$$W_g = 2514 \times 0{,}654 \times 0{,}45 = 740\ kg/m^3$$
$$W_f = 2514 \times 0{,}654 \times 0{,}55 = 904\ kg/m^3$$

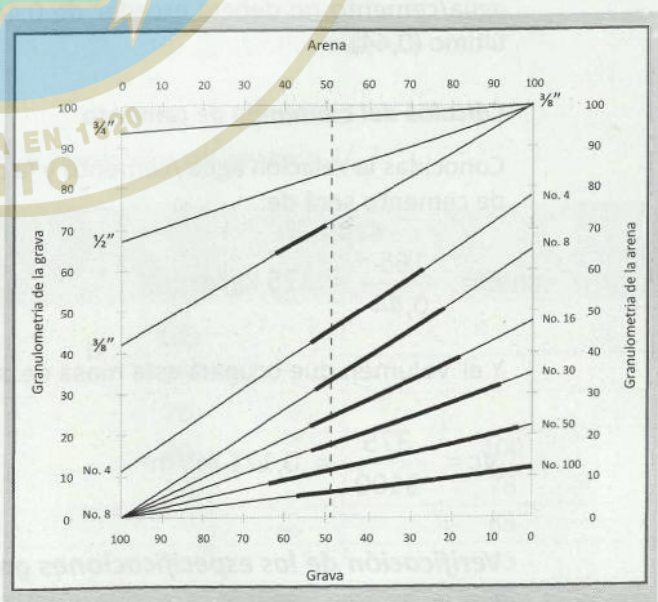


Figura 11.5 Optimización granulométrica del ejemplo 11.2

De esta forma quedan determinados todos los ingredientes de la mezcla los cuales se aprecian mejor en la tabla 11.21

Ajustes por humedad de los agregados

Pesos húmedos de los agregados

Peso húmedo de la grava
Mhg = 740 (1+0,03) = 762 kg/m^3

Peso húmedo de la arena
Mhf = 904 (1+0,05) = 949 kg/m^3

Agua en exceso o en defecto

Para la grava Ag = 740 (0,03 - 0,02) = 7,4 kg

Para la arena Af = 904 (0,05 - 0,01) = 36,16 kg

Tabla 11.20 Granulometría óptima del ejemplo 11.2

Tamiz Pulgadas	1	¾	½	⅜	No. 4	No. 8	No. 16	No. 30	No. 50	No. 100
% Pasa	100	97	86	73	48	36	25	28	13	8

A = 7,4 + 36,16 = 43,56 kg

La cantidad total de agua de mezclado será 165-43,56 = 121,44 kg/m^3

Tabla 11.21 Cantidades para 1 m^3 de concreto del ejemplo 11.2

Material	Peso W kg/m^3	Densidad D_1 kg/m^3	Volumen V_1 m^3/m^3	Ajustes por humedad W_1 kg/m^3
Cemento	375	3100	0,121	375
Agua	165	1000	0,165	121
Aire	0	0	0,060	0
Grava	740	2420	0,305	762
Arena	904	2590	0,349	949
Total	2,184 kg/m^3		1,00 m^3	

Ajustes a la mezcla de prueba

Con las cantidades de ingredientes calculados anteriormente, se elabora una mezcla de prueba y se mide el asentamiento y el peso unitario del concreto fresco. Con estos datos se pueden realizar los ajustes pertinentes en forma similar al ejemplo anterior.

Referencias bibliográficas capítulo 11

11.1 ACI-318. Código de las Construcciones de Concreto Reforzado, Medellín, ICPC, 1978.

11.2 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Concrete and Mineral Agregates Part. 4, Easton, ASTM, 1982.

11.3 ARANGO JESÚS M. Método Práctico para Dosificar Mezclas de Concreto. Notas Técnicas No. 12, Medellín, 1975.

11.4 ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Código Colombiano de Construcciones Sismoresistentes, Decreto 1400, Bogotá, 1984.

11.5 GARCÍA J.F. Método para la Dosificación de Hormigones. Publicaciones Técnicas del Instituto del Cemento Portland Argentino, Buenos Aires, 1981.

11.6 HIGUITA J. Diseño de Mezclas de Concreto. Ed. Argra Bogotá, 1951.

11.7 INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas Técnicas Colombianas para al Construcción. Bogotá, ICONTEC, 1983.

11.8 INSTITUTO COMLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO Y SOLINGRAL. Manual de Dosificación de Mezclas de Concreto. Medellín, ICPC,1979.

11.9 IMCYC. Control de calidad de Concreto Fresco, Revista IMCYC, Vol. 19, México, 1981.

11.10 INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. Práctica Recomendable para Dosificar Concreto Normal y Pesado. Mexico, IMCYC, 1980.

11.11 MATALLANA R. Y LADINO J. Granulometrías Optimas para Máximas Resistencias en el Concreto de Peso Normal. Universidad Militar, Bogotá, 1985.

11.12 MEVILLE A.M. Tecnología del Concreto. Vol. 2, México, YMCYC, 1980.

11.13 PORRERO J., RAMOS C., GRASES J. Manual del Concreto Fresco. Asociación Venezolana de Sistemas de Paredes Estructurales, Caracas. 1979.

11.14 PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. Design and Control of Concrete Mixturex. Illinois, PCA, 1979.

11.15 Sánchez Diego. Manual de Diseño de Mezclas de Concreto. Universidad de los Andes, Bogotá, 1984.

11.16 SÁNCHEZ DIEGO. Propiedades del Concreto, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 1985.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

REFERENCIAS

1 ACI-318. Código de las Construcciones de Concreto Reforzado, Medellín, ICPC, 1978.

2 ACI COMMITEE 221. Guide for Use of Normal Weight Aggregates in Concrete. Proceedings of the American Concrete Institute. Vol 81, No 2. Abril de 1984. p 115-139.

3 ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE INGENIERÍA SÍSMICA. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98.

4 CANO LL. V. Materiales Componentes del Concreto. Seminario de Tecnología del Concreto. Central de Mezclas de Sumapaz. Girardot. Junio de 1992.

5 CARDONA G. Aditivos. Seminario de Tecnología del Concreto. Central de Mezclas de Sumapaz. Girardot. Junio de 1992.

6 ICONTEC. Instituto Colombiano de Normas Técnicas Colombianas para la Construcción. Bogotá.

7 INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. Práctica recomendable para Dosificar Concreto Normal y Pesado. Mexico . IMCYC, 1980.

8 KOSMATKA S. Y PANARESSE W. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. México. 1992. 230 p.

9 MASS G. Agregate Selection and Evaluation. National Crushed Stone Association. Conference on Crushed Stone for Road and Street Construction and Reconstruction. Arlington. 1984.

10 MATALLANA R. Serie de Conocimientos Básicos: Concreto. Asocreto.

11 NEVILLE A. Tecnología del Concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. México D.F. 1992.

12 TERENCE C.H. High Performance Concrete. En: Concrete Products. Chicago. Junio de 1993.

13 SALAS J. R. Agregados para Concreto y su Control. Asociación Venezolana de Productores de Cementos. Caracas. 1981. 33 p.

14 SALAZAR J.A. Calidad de las Aguas para Preparar Concretos. Universidad del Valle. Materiales para el Concreto. Segunda Edición. Santiago de Cali. 1991. p 1-10.

15 SANCHÉZ DE GUZMÁN D. Manual de Diseño de Mezclas de Concreto. Universidad de los Andes, Bogotá. 1984.

16 SANCHÉZ DE GUZMÁN D. Tecnología del Concreto y del Mortero. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. 1987. 413 p.

17 SANDINO A. Y OTROS. Tecnología del Hormigón. Asociación de Ingenieros Civiles de la Universidad Nacional. 1984. 276 p.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1620

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST
OMNIUM
SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

GLOSARIO

A

Abastecimiento: suministro
Acabado: alisado, revestimiento, terminado, terminación superficial
Acelerador: acelerante
Aditivos: adiciones, agente
Aditivo inclusor de aire: incorporador de aire
Aditivo plastificante: aditivo fluidificante o fluidizante
Aditivo reductor de agua de alto rango: aditivo de alta actividad, aditivo de alto efecto
Aditivo retardador: retardante
Afinado: fratasado, revoque
Aglomerante: conglomerado
Agregado: árido
Agregado friable: agregado disgregable o desmenuzable
Agregado grueso: grava
Agregado ligero: agregado liviano, leve o ligero
Agua de mezclado: agua de amasado o de amasamiento
Ahogados: embebidos
Aire atrapado: aire ocluido
Aire incorporado: aire incluido
Alabeo: pandeo, curvado
Alberca: piscina
Alisado: froteado, allanado, aplanado
Allanado: alisado, aplanado, froteado
Amasadas: tandas
Amasado: rolado
Amasar: pastar
Anticongelante: descongelante, agente de deshielo
Apisonador: pisón
Apisonar: aplastar, comprimir
Aplanado: allanado, alisado
Aplomo: plomada, perpendicularidad
Apoyo: descanso, imposta
Apuntalar: apuntar, apontocar, esporar, estantalar
Apuntalamiento: entibación, contraventeado, arriostramiento
Arenar: enarenar
Armadura: refuerzo
Asentamiento: asiento, revenimiento
Áspera: granular
Atomizadores: nebulizadores
Autopista: carretera

COLEGIO CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST QUAM PRUDENTIOR SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

B

Balde: cubo, cubeta, tolva
Banda: tira
Banda transportadora: cinta
Barra: varilla
Barras metálicas pasantes: pasadores de carga, barras de transferencia, barras pasajuntas
Barrera de vapor: elemento aislante impermeable
Bolas de cemento: terrones de cemento
Bombeo: curvatura
Borde: acotamiento

C

Cabeceo: refrentado
Cal rápida: cal viva o cal virgen
Camada ultra delgada de concreto: whitetopping ultra delgado
Camión mezclador: mixer, hormigonera, revolvedora, mezcladora
Canal: chute, almenara
Canalón de descarga: canal
Carga muerta: peso propio, carga permanente
Carretilla: Buggy, bugui, coche manual
Cemento adicionado: cemento mezclado, cemento compuesto, cemento mezcla, cemento de adición, cemento combinado.
Cementos combinados: cementos adicionados, cemento mezclado, cemento compuesto, cemento de adición.
Cemento de alta resistencia inicial: cemento de alta resistencia temprana
Cemento de escoria: cemento siderúrgico
Cemento expansivo: cemento de retracción compensada o de contracción compensada
Cementos de albañilería: cemento de mampostería
Cilindros de prueba: probetas de prueba
Cimbra: formero, encofrado, formaleta
Cimentar: apoyar, cargar, basar
Cimentación: fundación, cimiento
Cimiento: embasamento, fundación, cimentación
Cisallamiento: corte o cizalladura
Clínker: clínquer
Clinkerización: clinquerización, cocción
Coeficiente de Poisson: relación de Poisson, razón de Poisson
Cohesión: coherencia, consistencia
Colar: fundir
Colocación: hormigonado, puesta en obra, colado, vaciado
Compactación por almacenamiento: compactación de bodega
Compactado: rodillazo
Compactador: apisonador
Concreto: hormigón
Concreto arquitectónico: concreto a la vista

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST MELIOR SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Concreto certificado: hormigón preparado
Concreto de contracción compensada: concreto de retracción compensada, concreto compensador de contracción.
Concreto de densidad elevada: concreto de gran peso, concreto de alta densidad
Concreto lanzado: hormigón proyectado, gunitado
Concreto liviano: concreto ligero
Concreto masivo: hormigón masivo
Concreto pórtland polimerizado: concreto modificado con polímeros
Concreto postensado: postensado, postensionado, pretensado por armaduras postesas
Concreto prefabricado: concreto premoldeado, precolado, hormigón preparado
Concreto premezclado: hormigón elaborado, concreto preparado, concreto industrializado
Concreto Pretensado: preesfuerzo, preesforzado, precomprimido
Concreto tremie: hormigón armado, concreto reforzado
Congelamiento - deshielo: congelación – deshielo, hielo - deshielo
Conglutinar: reunir
Cono de Abrams: cono de asentamiento
Conservación: mantenimiento
Consistencia rígida: consistencia seca
Construir: fabricar, eregir
Contrabombeo: badén
Contracción: retracción, encogimiento
Conservación: mantenimiento
Consistencia rígida: consistencia seca
Corazón: testigo, núcleo
Coronar: terminar, rematar
Corredor: pasillo
Corte: aserrado
Criba: cedazo
Cuarteado: agrietado
Cuarteadoras: fisuras finas superficiales, craze cracks
Cubierta: cobertura, tejado, cubierto
Cubo: balde
Cuchara: palustre, paleta
Cuela: funde
Culata: recámara, cara lateral (en edificios)

D

Dado: neto
Dala: vertedero, derramadero
Delimitar: contornear
Decantador: depósito
Declive: pendiente
Decorar: ambientar
Decoloración: descoloramiento
Deformación unitaria: deformación específica
Deforme: disforme

Demoler: derribar, destruir, derruir, derrumbar
Densidad: peso volumétrico, peso unitario, masa unitaria, peso específico, densidad a granel
Densidad relativa: densidad absoluta, gravedad específica
Desagüe: atarjea, dren
Desaplomar: desplomar, caer
Descanso: descansillo, apoyo, imposta
Descascaramiento: descascarillado, astilladura, desconchadura, despostilladura, engalletamiento, desmoronamiento, escamación, descamación, descantilladura.
Descimbrado: desencofrado
Desmoldante: desencofrante, desmoldeante
Desencofrar: desmontar
Desgastar: dañar, galguear
Desherrumbrar: limpiar
Desperdicio: mermas
Despiece: despezar, aparejo
Desplazamiento: desviación, declinación
Desviación: desvío
Diseñadores estructurales: estructuristas
Dragar: excavar, ahondar
Drenaje: drenes, desaguar

E

Embasamento: cimiento, embasamiento
Embebidos: ahogados
Empalizar: construir
Empalmar: ensamblar
Emparrillado: zampeado
Empedrado: adoquinado
Empenada: alabeada, curvada
Empernar: clavar
Empotrar: embarbillar
Encabillar: sujetar
Encadenar: enlazar
Encanalar: acanalar, canalizar
Encofrado: formaleta, moldaje, cimbra
Encofrar: armar
Enfilar: alinear
Engauchido: inclinado
Engrapado: asegurar
Enlazar: unir, atar
Ensayo: experimentación, prueba
Ensayo acelerado: ensayo rápido
Ensayo de Coulomb: ensayo "Rápido de Permeabilidad a los Cloruros"
Entrepiso: entresuelo
Epóxia: epóxica
Epóxica: epóxia
Erección: levantamiento

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Escavón: zanja, excavación
Eslabonar: trabar
Espesor: grosor
Esquisto: pizarra
Estanquidad: hermeticidad
Estera transportadora: banda, cinta
Estantalar: apuntalar
Estribo: entibo, entilbo, contrafuerte, apoyo, fundamento, tirante, elemento de amarre
Expande: dilata
Exudación: sangrado

F

Fila: hilera, hilada, filada
Filme: capa
Fisura: grieta, rajadura
Fisuración: agrietamiento o fisuramiento
Flama: llama
Flecha: deflexión
Fleje: estribo
Fluencia: flujo plástico o deformación deferida
Fluidez: flujo
Forja: fragua
Forma: cimbra, camón
Formaleta: forma, enconfrado, molde, cimbra
Fraguado: fragüe
Freático: subálveo
Fresco: plástico
Fricción: rozamiento
Fundación: cimiento
Fundar: estribar, apoyar
Funde: cuela
Fundidos In Situ: vertidos en el lugar
Fundir: colar

G

Gavera: gravilla, tapial
Gofrar: grabar
Gradadas: graduadas
Graduadas: gradadas
Granulometría: gradación, graduación
Grava: casquijo, glárea, guijarro, piedra machacada
Gravilladora: cribadora
Grieta: agrietadura, raja, fisura
Grosor: espesor

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

H

Henchir: rellenar, llenar
Hilar: linear
Hincar: fincar
Hinchamiento: abultamiento, abundamiento
Horma: molde
Hormigón: concreto
Hormigón aireado: hormigón aerocluso
Hormigón celular: hormigón aerocluso, aireado
Hormigón premezclado: hormigón elaborado, concreto premezclado
Hormigonado: vertido del hormigón
Hormigonar: colocar el hormigón en obra, vaciar el concreto
Hormiguero: coquera
Hundimiento: asentamiento

I

Impastar: amasar
Inclinado: engauchado
Incorporador de aire: inclusor de aire

J

Junta: acopladura, ensambladura, unión
Juntura: junta

L

Lámina: hojas
Lechada: grout
Levantamiento: erección
Levantar: construir, fabricar, edificar
Llana: receba, tolacha, trulla, frata, flota
Llosa: losa
Lona: manta
Losa: piso, placa o pavimento
Luz: longitud del vano, claro

M

Machacar: quebrantar, triturar
Madero: arigue
Mallo: mazo
Mampostería: calicanto, albañilería
Máquina niveladora: cuchillo motor
Masa específica: peso específico, densidad absoluta

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Masa específica relativa: densidad relativa, gravedad específica
Masa volumétrica: masa unitaria, densidad aparente, peso unitario, peso volumétrico, densidad a granel
Masar: amasar, pastar
Matamora: silo
Material cementante: material cementoso, material cementicio
Maza: mazo
Media caña: cavadura
Mermas: desperdicio
Mesa de fluidez: mesa de caídas, mesa de sacudidas
Mezcla: argamasa, mortero
Mezclado: amasado
Mezcladora: hormigonera
Mezclar: amasar, pastar
Mortero de cemento sin retracción: grout
Morrillo: grava gruesa
Morro: gravilla
Morterete: mortero
Muro: pared

N

Neumático: llanta
Nivelar: alinear, allanar
Niveladora: allanadora, topadora
Norma: estándar
Normal: perpendicular
Normativa: instrucción
Núcleos: corazones
Nuégado: hormigón

O

Obra: chapería, construcción
Olla mezcladora: cuba hormigonera

P

Palas: aspas, paletas
Palear: remover, elevar, transportar, paleo
Pañete: enlucido, paramento, repello, revoque, friso
Parales: costeros
Pasta: masa
Pavimento: solado, carretera
Pavimento de rápida habilitación al tránsito: fast track
Pegamento: cola

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Pelo: fisura, grieta
Pendiente: declive, inclinación
Pérdida de calcinación: pérdida por ignición o pérdida al fuego
Periodo de incubación: periodo de inducción
Pervibrador: vibrador
Petral: viga
Piedra: guijarro
Piedra triturada: piedra partida, piedra machacada o pedrejón
Pilar: columna, pila, estribo, machón, pilastra
Pipa: tubo
Pisar: apisonar
Piscina: alberca
Pisos brillantes: pisos lustrosos
Pisos Lustrosos: pisos brillantes
Pista: cancha
Pizarra: esquisto
Plana: llana
Plasticidad: docilidad
Plomo: plomada
Probeta: muestra de prueba, muestra de ensayo, espécimen de prueba
Promedio: valor medio, media
Pulir: alisar, afilar

Q

Ras: a nivel
Rasar: enrasar
Rebotante: riostra, tornapunta
Recalcar: ajustar
Recalzar: rehabilitar
Receba: llana
Reforzado: armado
Rehundido: vaciado
Rejola: ladrillo, baldosa
Relleno de juntas: sello de juntas
Resistencia a compresión: resistencia en compresión
Resistencia a cortante: corte
Resistencia a la Abrasión: resistencia al desgaste
Resistencia a la Tensión: resistencia a tracción o resistencia en tracción
Resistencia al derrapamiento: resbalón
Resistencia de diseño: resistencia de cálculo
Resistencia especificada: resistencia característica
Resquebrajamiento: cuarteo
Restricción: coacción, sujeción o fijeza
Retardador: retardante
Revenimiento: asentamiento en cono de Abrams, asentamiento
Revoltura: bachada, amasada, pastón

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Reunir: conglutinar
Revestir: revocar
Rodillado: compactado
Rolado: amasado
Rozamiento: fricción
Ruptura: rotura
Rotura: ruptura

S

Sacos: bolsas
Sangrado: exudación
Secado: desecación
Seísmo: sismo
Sellador: sellante
Sentamiento: asiento, asentamiento
Solado: limpieza, base
Solapar: traslapar
Soporte: apoyo, sostén, apeos
Substrato: lecho
Superficie: paramentos
Superplastificante: superfluidificante, superfluidizantes

T

Talocha: llana
Tamiz: cedazo, malla, criba
Tamizar: cribar
Tensión: esfuerzo
Tiempo frío/caliente: clima frío/caliente
Tongada: capa, dómida, tonga
Topadora: cabeceadora
Torre grúa: bongo
Torta: tortada
Trabajabilidad: manejabilidad, docilidad
Tronco de Abrams: tronco de revenimiento
Trulla: llana

U

Unión: junta

V

Vaciado: rehundido, vertido, colado, fundida
Vaciar concreto: hormigonar, colocar el concreto

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
OMNIUM POTENTIOR EST SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

Varilla: redondo
Varillado: compactado
Velocidad de desecación: velocidad de secado, tasa de secado
Verificación: chequeo
Vertedero: dala, derramadero
Vibrador: aguja vibrante
Vida útil: vida de servicio, vida de proyecto

Z

Zampa: pilote
Zapata: zarpa
Zarandar: cribar

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

ESTE LIBRO ES PROPIEDAD DEL SIB-UCE
SU VENTA ES PENADA POR LA LEY

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST
OMNIUM
SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

La presente edición se imprimió
en los Talleres de Nomos Impresores.
en el mes de Abril de 2010.

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST
OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST
OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

SIB - UCE

FECHA DE DEVOLUCIÓN		

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
POTENTIOR EST OMNIUM SAPIENTIA
FUNDADA EN 1620
QUITO

ESTE LIBRO ES PROPIEDAD DEL SIB-UCE
SU VENTA ES PENADA POR LA LEY

COLECCIÓN DEL

CONCRETO

- Manual de consejos prácticos sobre el concreto
  Cartilla José Concreto
- Manual de control de calidad del concreto en la obra
- Tecnología del concreto - Tomo 1: Materiales, propiedades y diseño de mezclas
- Tecnología del concreto - Tomo 2: Manejo y colocación en obra
- Construcción de estructuras
- Concreto arquitectónico
- Prácticas de construcción en pavimentos de concreto
- Durabilidad y patología del concreto
- Concepción y comportamiento de las edificaciones
- Concreto preesforzado: diseño y construcción
- El concreto y los terremotos: conceptos, comportamientos, patología y rehabilitación
- Diseño y construcción de pisos en concreto

UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FUNDADA EN 1826
QUITO

www.asocreto.org.co

Asocreto
Asociación Colombiana de Productores de Concreto

86490