

HORMIGÓN REFORZADO

ROBERTO ROCHEL AWAD



HORMIGÓN REFORZADO

Primera edición: abril de 2007

© Roberto Rochel Awad

© Fondo Editorial Universidad EAFIT

Cra.49 No. 7 sur-50

www.eafit.edu.co/fondoeditorial

Email: fonedit@eafit.edu.co

ISBN: 958-8281-xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

Diseño de colección: Miguel Suárez

Editado en Medellín

Colombia, Sur América

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	13
CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL HORMIGÓN	
1.1 COMPOSICIÓN	15
1.1.1 CEMENTO.....	16
1.1.2 AGUA.....	18
1.1.3 AGREGADOS.....	19
1.1.4 RELACIÓN AGUA / CEMENTO.....	19
1.2 COLOCACIÓN Y COMPACTACIÓN.....	20
1.3 CURADO.....	21
1.4 LA EDAD EN LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN.....	22
1.5 VELOCIDAD DE CARGA	23
1.6 ADITIVOS	24
1.7 NORMAS DE DISEÑO.....	25
CAPÍTULO 2. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE LOS MATERIALES	
2.1 ASPECTOS GENERALES.....	29
2.2 HORMIGÓN	29
2.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, f'_c	30
2.2.1.1 DEFORMACIÓN ULTIMA, ϵ_{uc}	32
2.2.1.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD, E_c	33
2.2.1.3 RELACIÓN DE POISSON, μ	35
2.2.2 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN, f_{ct}	35
2.2.3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN, f_r	37
2.2.4 RESISTENCIA A TENSIÓN CORTANTE, v_c	38
2.2.5 MÓDULO DE ELASTICIDAD A CORTANTE, G_c	39
2.2.6 COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA, α_c	40
2.3 ...ACERO	40
2.3.1 MÓDULO DE ELASTICIDAD A CORTANTE, E_s	41
2.3.2 COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA, α_s	42

2.3.3	CARACTERÍSTICAS DE LOS ACEROS NACIONALES.....	43
2.3.3.1	PESO Y DIMENSIONES NOMINALES DE LOS ACEROS NACIONALES.....	43
2.3.3.2	IDENTIFICACIÓN DE LOS ACEROS	44
2.4	HORMIGÓN REFORZADO.....	44
2.4.1	ASPECTOS GENERALES.....	44
2.4.2	REFUERZO LONGITUDINAL.....	45
2.4.3	REFUERZO TRANSVERSAL	46

CAPÍTULO 3. ASPECTOS GENERALES DEL DISEÑO

3.1	CRITERIOS	49
3.1.1.	MÉTODO DE LAS TENSIONES ADMISIBLES.....	49
3.1.2	MÉTODO DEL ESTADO LIMITE DE RESISTENCIA.....	49
3.2	TIPOS DE CARGA	50
3.2.1	CARGAS MUERTAS	50
3.2.1.1	MASA DE LOS MATERIALES	50
3.2.1.2	CARGAS MUERTAS MÍNIMAS.....	50
3.2.1.3	FACHADAS, MUROS DIVISORIOS Y PARTICIONES.....	51
3.2.1.3.1	FACHADAS.....	51
3.2.1.3.2	DIVISIONES Y PARTICIONES, MATERIAL TRADICIONAL	52
3.2.1.3.3	DIVISIONES Y PARTICIONES, MATERIAL LIVIANO.....	53
3.2.1.4	PESO DE LOS ACABADOS DE PISO.....	54
3.2.2	CARGAS VIVAS.....	54
3.3	DIMENSIONAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES	55
3.3.1	SEPARACIÓN LIBRE EN BARRAS, s	57
3.3.2	RECUBRIMIENTO DEL ACERO, r	57
3.4	EJEMPLOS	60

CAPÍTULO 4. MÉTODO DE LAS TENSIONES ADMISIBLES

4.1	INTRODUCCIÓN.....	69
4.2	RELACIÓN DE MÓDULOS, n	71
4.3	TENSIONES DE TRABAJO	71
4.4	SECCIONES BALANCEADAS, SUB-REFORZADAS Y SOBRE-REFORZADAS..	72
4.5	EQUILIBRIO ESTÁTICO DE LAS SECCIONES	73
4.6	MÉTODO DE LA SECCIÓN TRANSFORMADA (REFUERZO A TRACCIÓN).	73

4.7	MÉTODO DE LA SECCIÓN TRANSFORMADA (REFUERZO A COMPRESIÓN)	75
4.8	EJEMPLOS	77
4.9	PROBLEMAS PROPUESTOS.....	93

CAPÍTULO 5. CONTROL DE FLECHAS Y FISURAS

5.1	FLECHAS.....	97
5.1.1	ASPECTOS GENERALES.....	97
5.1.2	PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LA FLECHA INMEDIATA.....	100
5.1.3	EXPRESIONES PARA EL CÁLCULO DE FLECHAS	103
5.1.4	PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR LA FLECHA PLÁSTICA	104
5.1.5	FLECHAS MÁXIMAS PERMITIDAS.....	105
5.2	FISURAS	106
5.2.1	FISURAS POR RETRACCIÓN DE FRAGUADO.....	106
5.2.1.1	ANTES DEL FRAGUADO.....	106
5.2.1.2	DESPUÉS DEL FRAGUADO	106
5.2.1.3	RETRACCIÓN Y DILATACIÓN TÉRMICA	107
5.2.2	FISURAS POR CARGAS	107
5.2.3	OTRAS CAUSAS DE FISURACIÓN	107
5.2.4	COMO PREVENIR LAS FISURAS.....	108
5.3	LAS FISURAS Y LA NSR-98	110
5.4	LAS FISURAS Y EL CÓDIGO ACI-318-02.....	111
5.5	EJEMPLOS	113
5.6	PROBLEMAS PROPUESTOS.....	123

CAPÍTULO 6. MÉTODO DEL ESTADO LÍMITE DE RESISTENCIA

6.1	ANÁLISIS CRÍTICO DEL MÉTODO DE LAS TENSIONES DE TRABAJO....	127
6.2	HIPÓTESIS DEL MÉTODO DEL ESTADO LIMITE DE RESISTENCIA.....	128
6.3	FACTORES DE SEGURIDAD	129
6.3.1	FACTORES DE CARGA.....	130
6.3.2	FACTORES DE RESISTENCIA	130
6.4	NOMENCLATURA	131
6.5	EQUILIBRIO ESTÁTICO DE SECCIONES RECTANGULARES	132
6.6	CUANTÍA BALANCEADA, ρ_b	135
6.7	CUANTÍA MÁXIMA DE DISEÑO, $\rho_{\text{máx}}$	136
6.8	CUANTÍA MÍNIMA DE DISEÑO, $\rho_{\text{mín}}$	137

6.9	CONSIDERACIONES BÁSICAS DEL MÉTODO DEL ESTADO LIMITE DE RESISTENCIA	138
6.10	CUANTÍA DE DISEÑO.....	140
6.11	EJEMPLOS	141

CAPÍTULO 7. DISEÑO A FLEXIÓN DE SECCIONES RECTANGULARES

7.1	DISEÑO A FLEXIÓN, ARMADURA A TRACCIÓN	149
7.1.1	EXPRESIONES GENERALES	149
7.1.2	ELABORACIÓN DE AYUDAS DE DISEÑO.....	150
7.1.3	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO	154
7.1.4	ESPECIFICACIONES PARA EL DESARROLLO DEL REFUERZO..	155
7.2	DISEÑO A FLEXIÓN, ARMADURA A COMPRESIÓN	156
7.2.1	EXPRESIONES QUE RIGEN EL DISEÑO	156
7.2.2	REVISIÓN DE SECCIONES.....	158
7.3	EJEMPLOS	159
7.4	PROBLEMAS PROPUESTOS.....	183

CAPÍTULO 8. DISEÑO A FLEXIÓN DE SECCIONES EN T Y L

8.1	DESCRIPCIÓN.....	187
8.2	ANCHO EFECTIVO DE LA ALETA, b_e	187
8.3	EXPRESIONES DE DISEÑO.....	189
8.4	LIMITES DE LA CUANTÍA.....	191
8.4.1	CUANTÍA MÁXIMA DE DISEÑO	191
8.4.2	CUANTÍA MÍNIMA DE DISEÑO.....	192
8.5	PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO DE SECCIONES EN “T”	192
8.6	PROCEDIMIENTO PARA LA REVISIÓN DE SECCIONES EN “T”	193
8.7	EJEMPLOS	195
8.8	PROBLEMAS PROPUESTOS.....	215
8.9	DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL DISEÑO DE SECCIONES EN T Y L.....	219
8.10	DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA REVISIÓN DE SECCIONES EN T Y L...	221

CAPÍTULO 9. DISEÑO A TENSIONES CORTANTES

9.1	TENSIONES DE CORTANTE EN VIGAS HOMOGÉNEAS RECTANGULARES.....	223
9.2	TENSIONES DE FLEXIÓN EN VIGAS HOMOGÉNEAS RECTANGULARES.....	224

9.3	TENSIONES COMBINADAS EN VIGAS HOMOGÉNEAS RECTANGULARES	224
9.4	TENSIONES COMBINADAS EN VIGAS DE HORMIGÓN REFORZADO.....	226
9.5	CLASES DE REFUERZO A TENSIONES CORTANTES.....	226
9.6	CRITERIOS DE DISEÑO	228
9.7	MODELO MATEMÁTICO PARA EL ANÁLISIS DE TENSIONES CORTANTES.....	231
9.8	DISEÑO A TENSIONES CORTANTES.....	233
9.8.1	RESISTENCIA A TENSIONES CORTANTES DEL HORMIGÓN, V_c	234
9.8.2	RESISTENCIA A TENSIONES CORTANTES DE LOS ESTRIBOS, V_s	235
9.9	ESPECIFICACIONES GENERALES DE DISEÑO	237
9.9.1	SECCIÓN CRÍTICA PARA EL DISEÑO.....	237
9.9.2	REFUERZO MÍNIMO A CORTANTE	238
9.9.3	TENSIÓN CORTANTE MÁXIMA PARA ESTRIBOS	239
9.9.4	MÁXIMA SEPARACIÓN DE LOS ESTRIBOS	239
9.9.5	DIMENSIONES DE LOS ESTRIBOS.....	240
9.10	EJEMPLOS	242

CAPÍTULO 10. DISEÑO DE LOSAS EN UNA DIRECCIÓN

10.1	INTRODUCCIÓN.....	251
10.2	FUNCIONAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS LOSAS EN EDIFICIOS	251
10.3	CLASIFICACIÓN	252
10.4	JUNTAS DE CONSTRUCCIÓN	253
10.5	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PARA LOSAS MACIZAS EN UNA DIRECCIÓN.....	254
10.6	PROCEDIMIENTO DE DISEÑO PARA LOSAS ALIGERADAS.....	256
10.6.1	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO PARA LOSAS ALIGERADAS.....	259
10.7	APOYO DE LOSAS ALIGERADAS SOBRE MUROS	260
10.8	REFUERZO DE RETRACCIÓN Y TEMPERATURA	260
10.9	EJEMPLOS	261

CAPÍTULO 11. DISEÑO A LOSAS EN DOS DIRECCIONES

11.1	GENERALIDADES	279
11.2	MÉTODO DIRECTO DE DISEÑO	282
11.2.1	LIMITANTES DEL MÉTODO	282

11.2.2	ESPESORES MÍNIMOS DE LAS LOSAS	283
11.2.3	MOMENTO ESTÁTICO TOTAL	284
11.2.4	DISTRIBUCIÓN DEL MOMENTO ESTÁTICO TOTAL.....	286
	11.2.4.1 DISTRIBUCIÓN DEL MOMENTO A LOS ANCHO DE LA FRANJA	288
11.2.5	DISEÑO A FLEXIÓN	289
11.2.6	REVISIÓN DE LA TORSIÓN.....	291
11.2.7	DISEÑO A CORTANTE	292
11.3	MÉTODO DE LOS COEFICIENTES.....	293
	11.3.1 ALCANCE	293
	11.3.2 FRANJAS.....	293
	11.3.3 CONDICIONES DE BORDE.....	293
	11.3.4 SECCIONES CRÍTICAS PARA MOMENTO.....	293
	11.3.5 MOMENTOS DE DISEÑO EN LA FRANJA CENTRAL.....	294
	11.3.6 MOMENTOS NEGATIVOS EN EL APOYO COMÚN DE PANELES DE DIFERENTE TAMAÑO.....	294
	11.3.7 MOMENTO DE DISEÑO EN LA FRANJA DE COLUMNAS	294
	11.3.8 NOMENCLATURA	294
11.4	EJEMPLOS	299

CAPÍTULO 12. VIVIENDAS DE UNO O DOS PISOS

12.1	SISTEMA ESTRUCTURAL	321
12.2	CRITERIOS GENERALES.....	321
12.3	CIMENTACIONES	324
	12.3.1 SISTEMA DE CIMENTACIÓN	324
	12.3.2 CONFIGURACIÓN EN PLANTA	325
	12.3.3 ESTUDIOS GEOTÉCNICOS.....	325
	12.3.4 CIMENTOS EN HORMIGÓN CICLÓPEO CON VIGAS DE CORONA	326
	12.3.5 CIMENTOS EN HORMIGÓN REFORZADO.....	327
	12.3.6 INSTALACIONES EMPOTRADAS.....	330
	12.3.7 ANCLAJE DE LAS COLUMNAS DE CONFINAMIENTO.....	330
12.4	MUROS.....	331
	12.4.1 CLASIFICACIÓN	331
	12.4.2 DIMENSIONES DE LOS MUROS ESTRUCTURALES.....	332
	12.4.3 UNIDADES DE MAMPOSTERÍA.....	333
	12.4.3.1 UNIDADES DE HORMIGÓN.....	333

12.4.3.2 UNIDADES DE ARCILLA.....	334
12.4.3.3 UNIDADES DE SILITO-CALCÁREAS.....	334
12.4.4 MORTEROS DE PEGA E INYECCIÓN.....	334
12.4.4.1 MORTERO DE PEGA	334
12.4.4.2 MORTERO DE INYECCIÓN	335
12.4.5 LONGITUD DE LOS MUROS ESTRUCTURALES CONFINADOS	336
12.5 CONFINAMIENTO DE LOS MUROS ESTRUCTURALES.....	337
12.5.1 COLUMNAS DE CONFINAMIENTO	337
12.5.2 VIGAS DE CONFINAMIENTO.....	340
12.5.3 CINTAS DE AMARRE	341
ANEXO A. ANCLAJES Y TRASLAPOS DEL REFUERZO	
A.1 INTRODUCCIÓN.....	345
A.2 LONGITUD DE DESARROLLO O DE ANCLAJE.....	346
A.2.1 GENERALIDADES	346
A.2.2 LONGITUD DE DESARROLLO, BARRAS RECTAS A TRACCIÓN.....	347
A.2.3 LONGITUD DE DESARROLLO, BARRAS A TRACCIÓN CON EXTREMO EN GANCHO ESTÁNDAR	348
A.2.4 LONGITUD DE DESARROLLO, BARRAS A FLEXIÓN.....	350
A.2.5 LONGITUD DE DESARROLLO, BARRAS A COMPRESIÓN	351
A.3 LONGITUD DE TRASLAPO.....	351
A.3.1 LONGITUD DE TRASLAPO, BARRAS A TRACCIÓN	352
A.3.2 LONGITUD DE TRASLAPO, BARRAS A COMPRESIÓN	352
TABLAS.....	353

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este libro es iniciar al estudiante en los principios fundamentales del hormigón reforzado, se incluye suficiente información para un entendimiento completo. En este texto se aplican las disposiciones reglamentarias de las Normas Colombianas de Diseño y Construcciones Sismo-Resistentes (NSR-98), el ACI-318-02 y ACI-318-05.

El tratamiento de las normas se hace de manera crítica, se discuten, analizan y comparan cada una de las disposiciones de las normas anteriores, de manera que el estudiante conozca la justificación actual de las especificaciones y tenga una actitud abierta al cambio, para asimilar las nuevas disposiciones que a través de la investigación y la experiencia llevarán en el futuro a nuevas normas de diseño.

Todos los temas son tratados de manera ordenada y secuencial para permitir su implementación en computadores, tanto para el diseño como para la revisión de las secciones rectangulares, en “T” y en “L”, se incluyen diagramas de flujo para facilitar su sistematización.

Se mejoran sustancialmente las ediciones anteriores aumentando el número de ejemplos hasta cubrir todos los posibles casos de diseño y revisión, y se ilustran los casos tratados con fotografías.

Se hace un énfasis especial en el detallado de los elementos estructurales, en todos los capítulos se ilustra con ejemplos la manera de presentar en planos los resultados del diseño.

En la evaluación de las cargas de acabados y particiones se hacen ejemplos numéricos paso a paso con el fin de discutir la pertinencia o no de los valores mínimos de diseño sugeridos por la norma colombiana.

Se le adiciona a las ediciones anteriores el tema de losas o placas bidireccionales, el cual se ilustra con ejemplos de diseño por los métodos directo y de coeficientes.

Todos los cambios que se han venido presentando en los últimos años llevaron al autor a revisar las ediciones anteriores, en principio, con el fin de incluirlos en la parte pertinente de cada capítulo, en la que se

estudian las especificaciones de diseño, pero además, se ha aprovechado la oportunidad para modificar otros temas diferentes a las especificaciones en sí, en gran medida como resultado del estudio y análisis de las publicaciones que han aparecido recientemente acerca de los diferentes temas tratados, y en parte, como respuesta a las críticas constructivas, recibidas de parte de colegas y estudiantes a la edición anterior.

Agradecimientos por la ayuda recibida de varias fuentes, en particular de los ingenieros Juan Carlos Vélez y de Gabriel Ignacio Gutiérrez Jaramillo quienes con sus sugerencias y críticas contribuyeron directamente a la preparación de esta edición.

CAPÍTULO 1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL HORMIGÓN

1.1 COMPOSICIÓN

El hormigón es un material de construcción, no homogéneo, constituido por la mezcla de cemento, arena, cascajo y agua. El cemento es el material ligante; la arena y el cascajo son materiales de relleno, llamados también agregados; el agua es el elemento catalizador que reacciona con el cemento y hace que éste desarrolle sus propiedades ligantes.

La mezcla del cemento con el agua se denomina *PASTA*, y cumple las siguientes funciones:

- En estado plástico sirve como lubricante permitiendo el deslizamiento entre partículas.
- En estado sólido, en unión con los agregados, contribuye a proporcionar a la mezcla su resistencia mecánica. Además, rellena los espacios entre partículas proporcionándole al hormigón la característica de impermeabilidad.
- Los agregados pétreos, arena y cascajo, cumplen las siguientes funciones:
 - En unión con la pasta, proporcionan la resistencia mecánica.
 - Son materiales de relleno, con lo cual se logra que el hormigón sea un material económico.
 - Al ser materiales inertes, controlan los cambios volumétricos.

Si a la pasta se le adiciona arena, toma el nombre de *Mortero*, el cual se emplea en la pega de ladrillos y en el revoque o pañete de muros.

Si al mortero se le adiciona cascajo, se obtiene el *Hormigón* propiamente dicho. Para mejorarle su resistencia y su ductilidad se refuerza con barras de acero, obteniéndose así el *Hormigón reforzado*.

Existe otro material denominado *Hormigón ciclópeo*, constituido por hormigón y piedras de un tamaño aproximado de 10 a 20 cm. que se emplea en la construcción de muros de gravedad y en el realce de cimentaciones.

Dependiendo de la forma como se utilice el refuerzo se obtiene el *Hormigón pretensionado* o el *Hormigón postensionado*. En ellos, el acero se tensiona antes o después del vaciado. El hormigón pretensionado se emplea en la prefabricación de elementos de luces pequeñas; el hormigón postensionado se emplea en vigas de grandes luces, como es el caso de los puentes.

Los materiales constituyentes del hormigón son de gran abundancia en la naturaleza. En la producción del mismo no se requiere de mano de obra calificada, lo cual hace que sea un material de construcción muy económico, que además se adapta a cualquier tipo de clima, resiste la acción del fuego, se acomoda con facilidad a cualquier forma estructural y bajo un adecuado diseño se comporta de manera muy aceptable frente a los efectos de sismos intensos.

La propiedad mecánica más sobresaliente del hormigón es su resistencia a la compresión, f'_c , la cual depende de muchos factores, incluyendo la edad, la calidad y proporciones de los materiales constituyentes, la producción y manejo del hormigón fresco y los cuidados posteriores al hormigón endurecido. Los principales factores que influyen en la resistencia del hormigón se describen a continuación.

1.1.1 CEMENTO

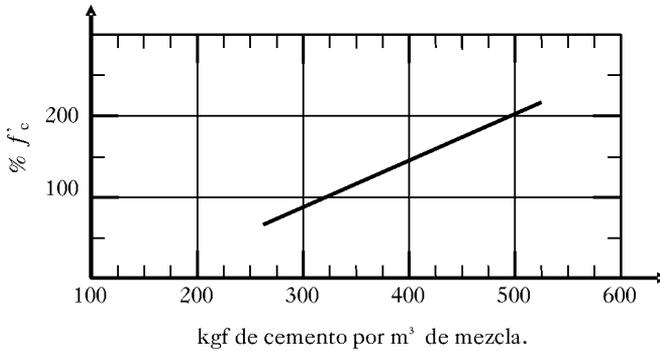
La palabra cemento se emplea para designar a toda sustancia que posea propiedades ligantes, cualquiera que sea su origen. Dada la alta producción de cemento portland, con relación a los otros cementos, su uso se ha generalizado.

El cemento portland es un cemento hidráulico, producido de materiales calcáreos seleccionados, pulverizados y mezclados. Esta mezcla se calcina a 1.350 °C y da como resultado un clinker, el cual se muele y se le adiciona yeso para regular el fraguado. El cemento debe cumplir con las normas NTC 121 y NTC 321.

El cemento, tal como se usa en el hormigón, tiene la propiedad de formar una pasta al mezclarse con el agua; dicha pasta se endurece con el tiempo sin que las partículas lleguen a separarse. Este proceso de endurecimiento de la pasta se denomina fraguado.

A mayor cantidad de cemento en una mezcla, mayor será su resistencia, pero al mismo tiempo mayor será la retracción del fraguado y mayor el costo de la misma.

FIGURA 1.1 EFECTO DEL CONTENIDO DE CEMENTO EN LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN.



La reacción del cemento con el agua es exotérmica, libera calor, al enfriarse la mezcla presenta contracción del hormigón (retracción del fraguado), lo cual constituye un aspecto desfavorable del cemento. Al colocar el hormigón en forma masiva, se libera gran cantidad de calor, la cual va acompañada de una gran retracción del fraguado que genera grietas o fisuras que desmejoran la resistencia de la estructura.

CLASES DE CEMENTOS:

- **Tipo 1:** Para hacer hormigones de uso general en la construcción, tiene una amplia aplicación en la elaboración de pastas y lechadas de inyección, morteros de albañilería, morteros de mampostería, hormigones simples y reforzados, y obras de hormigón en general.
- **Tipo 2:** Para empleo cuando se desea un bajo calor de hidratación, como es el caso de masas de hormigón, estribos de puentes y grandes muros de contención.
- **Tipo 3:** Es un cemento de uso estructural a temprana edad, su aplicación es especialmente recomendada en la producción de hormigones de alta resistencia inicial, sin el uso de aditivos acelerantes. Sin embargo, también es ampliamente recomendado en la elaboración de hormigones de alto desempeño, como aquellos de más de 420 kgf / cm² de resistencia final a la compresión.
- **Tipo 4:** Para obras donde se requiera el empleo de hormigón en masa y en donde se requiera un bajo calor de hidratación.

- **Tipo 5:** Para obras donde se requiera alta resistencia al ataque químico, bajo calor de hidratación y en donde no se requieran altas resistencias iniciales. Es el cemento especial para obras marítimas, hormigones en contacto con suelos que contengan sulfatos y en la construcción de grandes masas de hormigón.

En Colombia se fabrican los cementos tipo 1 y tipo 3, los otros se producen bajo pedido especial^{1,2}.

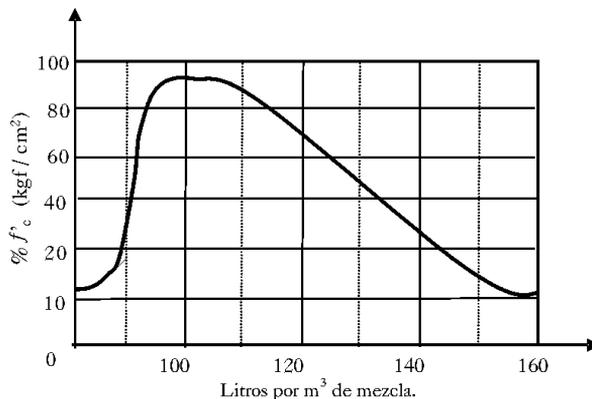
TABLA 1.1 COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS CEMENTOS.

TIPO DE CEMENTO		1	2	3	4	5
Silicato tricálcico	C_3S	50	42	60	26	40
Silicato dicálcico	C_2S	24	33	13	50	40
Aluminato tricálcico	C_3A	11	5	9	5	4
Aluminoferrita tetracálcica	C_4AF	8	13	8	12	9
Finura (Wagner)	g/cm^3	1.800	1.800	2.600	1.900	1.900

1.1.2 AGUA

El agua permite que el cemento pueda fraguar y le comunica a la mezcla la fluidez necesaria para poderla manejar. Se recomienda cumplir con la norma NTC 3459.

FIGURA 1.2 EFECTO DEL CONTENIDO DEL AGUA EN LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN.



Es de gran importancia regular el contenido de agua de una mezcla, un exceso de agua desmejora su resistencia al permitir la segregación de los agregados; además, al evaporarse el excedente de agua se produce un hormigón poroso; por el contrario, una deficiencia en el contenido de agua, conduce a mezclas poco fluidas, con hormigones porosos, poco impermeables y de baja resistencia.

1.1.3 AGREGADOS

Por agregado fino o arena se entiende aquel que contiene las partículas comprendidas entre 5 y 0.075 milímetros.

Por agregado grueso o cascajo se entiende aquel cuyas partículas tienen tamaño superior a 5 milímetros.

Los agregados para el hormigón deben cumplir la norma NTC 174.

Las características más importantes de un agregado son:

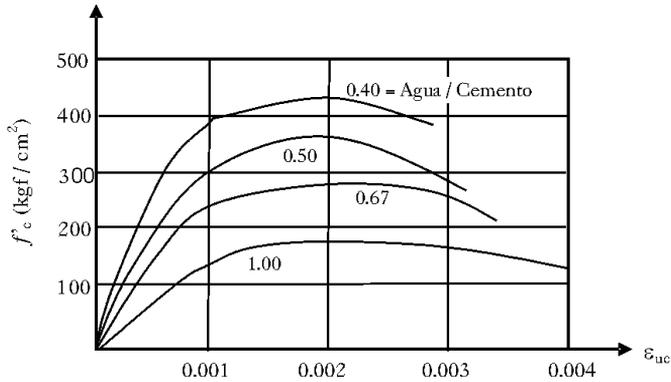
- Granulometría.
- Densidad aparente.
- Absorción.
- Masa unitaria seca.
- Contenido de materia orgánica.
- Contenido de arcilla.
- Forma de las partículas.
- Superficie de las partículas.

1.1.4 RELACIÓN AGUA / CEMENTO

El factor más importante que afecta la resistencia del hormigón es la relación agua / cemento. Para producir la hidratación completa de todo el cemento es necesario emplear una relación agua / cemento de 0.25 (por peso), una relación adicional y mayor de 0.1 es necesaria para que el hormigón tenga una trabajabilidad adecuada, lo cual se obtiene para relaciones agua / cemento superiores a 0.50. La forma como la relación agua / cemento afecta la resistencia del hormigón a compresión y a tracción se indica en la figura 1.3.

Al incrementar esta relación se disminuye la resistencia a compresión, a tracción y al desgaste, así como el módulo de elasticidad. Al variar esta relación, varía la docilidad y en consecuencia su resistencia.

FIGURA 1.3 EFECTO DE LA RELACIÓN AGUA / CEMENTO EN EL HORMIGÓN.



1.2 COLOCACIÓN Y COMPACTACIÓN

En la obra debe prestarse atención muy especial al proceso de vaciado y colocación del hormigón. La mezcla debe utilizarse antes de la iniciación del fraguado con la manejabilidad adecuada.

Antes de colocar el hormigón, debe revisarse la formaleta, la cual debe ser rígida y resistente a las cargas a soportar, no presentar deformaciones o asentamientos perjudiciales y no debe absorber el agua de la mezcla; además, se requiere que sea homogénea y continua para evitar que afecte la resistencia y acabados de los elementos.

Durante la colocación del hormigón debe tenerse en cuenta:

- Prever y verificar el correcto funcionamiento del equipo para la colocación y compactación.
- Planificar un correcto transporte del hormigón dentro de la obra para evitar la segregación.
- Distribuir uniformemente la mezcla, evitando formar grandes depósitos, en espera de que por sí misma se distribuya.
- Vibrar adecuadamente la mezcla. Un exceso de vibrado produce segregación, ascienden las partículas finas y descienden las gruesas. La falta de vibrado produce vacíos dentro de la mezcla.
- El hormigón no debe ser colocado en caída libre, pues esto produce segregación.
- Una vez colocado el hormigón sigue el proceso de compactación, cuyo fin es alcanzar la máxima densidad posible. La compacta-

ción se debe realizar de acuerdo con la consistencia de la mezcla, vibrado para mezclas secas y picado para mezclas blandas.

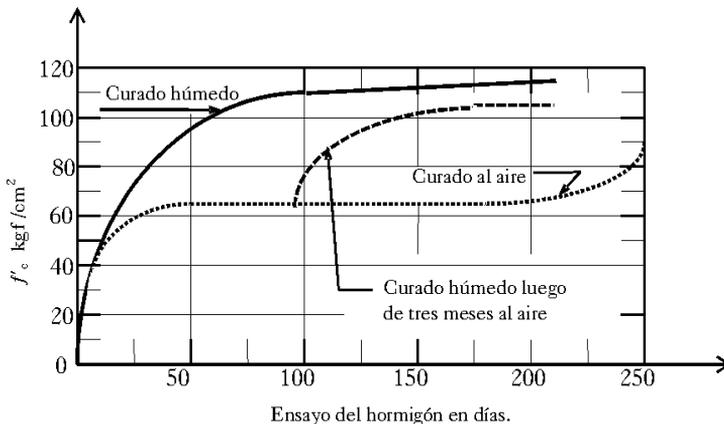
- Compactar masas pequeñas, vibrando espesores no mayores de 50 cm., teniendo la precaución de penetrar la capa anterior. El vibrador se debe introducir lenta y verticalmente. La duración y distancia debe ser la adecuada para producir un acabado uniforme.

1.3 CURADO

El curado se define como la prevención del secado prematuro del concreto bajo un nivel de temperatura favorable por un periodo específico. Si el agua de la mezcla escapa a edades tempranas, la hidratación del cemento no es total y se producen fisuras por retracción hidráulica, por ello es necesario tomar precauciones antes y después de la colocación del hormigón. Previamente el suelo y las formaletas que van a estar en contacto con el hormigón deben humedecerse para evitar que absorban el agua de la mezcla, y una vez se inicia el fraguado se deben proporcionar condiciones adecuadas para el curado.

Durante los primeros días del fraguado es indispensable mantener la humedad de la mezcla, pues la hidratación del cemento continúa durante varios días o meses. Si se mantiene un adecuado curado, se facilita una mejor hidratación del cemento y en consecuencia se obtienen estructuras más resistentes.

FIGURA 1.4 EFECTO DEL CURADO EN LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN.



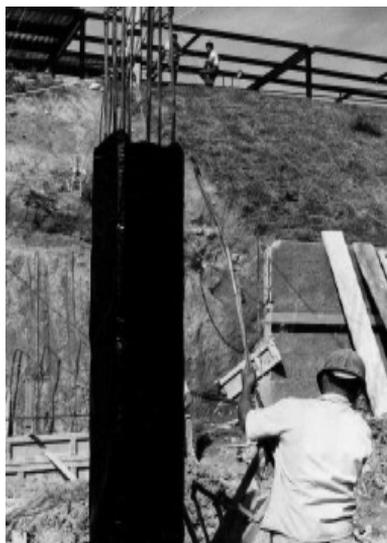
El periodo del curado de los elementos de hormigón debe ser por lo menos de 7 días a una temperatura mínima de 10°C y máxima de 32°C, NSR-98 Sec. C.5.11.1, este periodo puede reducirse a 3 días en el caso de hormigones de alta resistencia y hormigones con acelerantes del fraguado. Alternativamente, cuando se hacen ensayos de resistencia sobre cilindros hay que mantener el curado hasta que la resistencia sea el 70% de la resistencia especificada.

En el caso de vigas, columnas y muros no es necesario protegerlos de la pérdida de humedad mientras que las formaletas estén colocadas; no obstante, si las formaletas se retiran antes de los cuatro primeros días es recomendable utilizar algún método de curado, posterior a su retiro.

El curado del hormigón se realiza rociándolo con agua varias veces durante el día, o bien, impidiendo la evaporación del agua, forrando la estructura con polietileno.

El hormigón que ha sido curado adecuadamente es más resistente a las diferentes solicitaciones de carga y más durable a los ataques químicos.

El fisuramiento por retracción que ocurre cuando el desecamiento del hormigón no es evitado, origina superficies agrietadas que aparentan ser sólo un problema estético; sin embargo, pueden causar daños al hormigón y a su refuerzo debido a que facilitan la penetración dentro del hormigón de los agentes agresivos del medio ambiente y causar la corrosión del refuerzo.



Fotografía 1. Curado de columna forrándola con polietileno.

1.4 LA EDAD EN LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

La resistencia del hormigón se incrementa apreciablemente con la edad, ya que la hidratación del cemento continúa por varios meses. En la práctica, la resistencia del hormigón se determina por el ensayo de cilindros

a las edades de 7 y 28 días. Como un dato práctico, la resistencia del hormigón a los 28 días es 1.5 veces la resistencia a los 7 días, este rango de variación está entre 1.3 y 1.7. El código Británico acepta el hormigón cuya resistencia a los 7 días no sea inferior a 2 / 3 de la resistencia requerida a los 28 días. La resistencia a los 28 días puede estimarse a partir de la resistencia a los 7 días, mediante el empleo de fórmulas empíricas, tales como:

$$f'_{c(28)} = C + K * f'_{c(7)} \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (1.1)$$

Esta relación depende fundamentalmente del tipo de cemento empleado, en consecuencia, es una relación aproximada. Debe entonces cada laboratorio de materiales deducir las expresiones que se ajusten a los cementos del medio. Información adicional para varios cementos colombianos los encuentra el lector en la referencia 2, páginas 176 a 178.

En Medellín se emplean las siguientes relaciones:

$$\text{Solingral:} \quad f'_{c(28)} = 1.13 * f'_{c(7)} + 50 \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (1.2)$$

$$\text{U. EAFIT} \quad f'_{c(28)} = 1.014 * f'_{c(7)} + 63.9 \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (1.3)$$

$$\text{U. Nacional:} \quad f'_{c(28)} = f'_{c(7)} + 7.42 * \sqrt{f'_{c(7)}} \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2) \quad (1.4)$$

Otras relaciones aproximadas, pero también importantes, que relacionan la resistencia del hormigón a diferentes edades, referencia 1, son:

$$f'_{c(28)} = \sqrt{f'_{c(3)}} + 17 * \sqrt{f'_{c(7)}} \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2)$$

$$f'_{c(1 \text{ año})} = 1.35 * f'_{c(28)} \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2)$$

$$f'_{c(90)} = 1.20 * f'_{c(28)} \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2)$$

$$f'_{c(28)} = 1.16 * \sqrt{f'_{c(14)}} \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2)$$

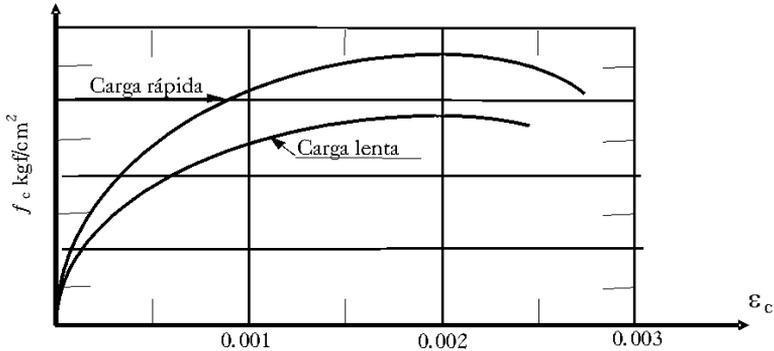
$$f'_{c(28)} = 1.0026 * \sqrt{f'_{c(14)}} + 41.13 \quad (\text{kgf} / \text{cm}^2)$$

1.5 VELOCIDAD DE CARGA

La resistencia a la compresión del hormigón se determina a partir de ensayos sobre cilindros o cubos a los cuales se les aplica una carga axial de compresión en pocos minutos.

Bajo cargas sostenidas por varios años la resistencia a compresión del hormigón se reduce cerca del 30%. Si la carga se aplica en un día la resistencia a compresión disminuye cerca del 10%. Luego, las cargas sostenidas o permanentes, así como el efecto de las cargas dinámicas y de impacto, deben ser tenidas en cuenta en el diseño.

FIGURA 1.5 EFECTO DE LA VELOCIDAD DE CARGA.



1.6 ADITIVOS

Son productos que se adicionan al hormigón antes o durante el vaciado para modificar algunas de sus propiedades.

Hay ocasiones en las cuales es conveniente modificar las propiedades normales del hormigón según el tipo de obra a construir o según sus características.

En algunas obras es necesario que el hormigón adquiera rápida resistencia en pocas horas o que sus características de permeabilidad sean mejores o que su resistencia a los agentes atmosféricos sea mejor a los del hormigón normal. En estos casos debe adicionarse una sustancia que produzca el efecto deseado sin alterar la resistencia a la compresión del hormigón.

Los diferentes aditivos pueden clasificarse en:

- Plastificantes.
- Acelerantes.
- Retardadores.
- Productos que producen expansión.
- Repelentes de agua.

1.7 NORMAS DE DISEÑO

En las secciones anteriores se ha dado un ligero recuento, sobre algunos de los factores que influyen en la calidad de un buen hormigón. Las variables son muchas y se requiere normalizar los procedimientos de ensayos de los materiales y los de diseño, para garantizar con ello un mínimo de seguridad en las estructuras de hormigón, es decir, se requieren formular normas mínimas de diseño.

Para desarrollar normas o códigos de diseño, es necesario que cada país aporte parte de sus recursos económicos para el desarrollo de investigaciones que conduzcan a tecnologías propias de cada región. Colombia, como casi todos los países del tercer mundo, no ha contado con dichos recursos, y su desarrollo tecnológico ha sido muy pobre. Este vacío se ha llenado en épocas anteriores adoptando al medio códigos desarrollados en otros países. El más empleado en Colombia es el código de la American Concrete Institute, el código ACI.

En los últimos años y a causa de los desastres que han ocasionado los últimos sismos en Colombia, se han aunado los esfuerzos de las diferentes asociaciones de ingenieros, con el fin de adaptar algunas normas al medio que permitan regular la actividad de diseño y construcción. En la referencia 6 el lector encontrará un recuento detallado de los estudios realizados en Colombia.

En 1974 se creó la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, AIS; con el propósito de estudiar los aspectos de seguridad de las estructuras de hormigón reforzado ante movimientos sísmicos, en mayo de 1981 publicó su norma AIS-100-81, basada en el código norteamericano ATC-3, la modelación adoptada para definir los parámetros de diseño aún es cuestionada, pero ha sido, sin lugar a dudas, un aporte importantísimo para la ingeniería nacional. Habrá que esperar algunos años, muchos quizás, para que el país disponga de información suficiente, en número y en calidad de eventos sísmicos para desarrollar normas propias.

El Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, ICONTEC, inició en 1978 la elaboración del Código Colombiano de Estructuras de Hormigón Reforzado. La base logística de este código fue el ACI de 1977 (ACI-318-77). Fruto de este esfuerzo es la norma ICONTEC 2.000, adoptada por el Consejo Nacional de Normas y Calidades, mediante resolución No 1.092 de Junio 17 de 1983 y que fue de obligatorio cumplimiento.

La norma ICONTEC 2.000 define en su sección A, los requisitos sísmicos, la norma AIS-100-81, para lo concerniente al diseño sismo-resistente.

A principios de 1983 se publica la norma ICONTEC 2.000. Estando la ingeniería nacional en su discusión, se presenta el sismo que semidestruye la ciudad de Popayán el 31 de marzo de 1983. Ante la magnitud de la tragedia, el Gobierno Nacional solicita al ICONTEC la formulación de una norma que propendiera por el logro de estructuras sismo-resistentes. Se revisó entonces la norma AIS-100-81 que condujo a un nuevo documento, AIS-100-83, que sirvió como base para la modificación de la norma ICONTEC 2.000.

El 7 de junio de 1984 se formula en Colombia el Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes (CCCSR-84), basado en la norma ICONTEC 2.000 y en la norma AIS-100-83.

El CCSR-84 adopta para el medio colombiano, especificaciones sísmicas propias y conserva, en un gran porcentaje, las bases de diseño formuladas por el ACI-318-83.

Al poco tiempo de haberse oficializado la primera versión del Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes, se presentaron en el mundo varios terremotos que mostraron serias fallas en estructuras diseñadas con códigos modernos. Los terremotos de México (Septiembre de 1985) y El Salvador (Octubre de 1986), pusieron de manifiesto el comportamiento deficiente del sistema estructural de placas y columnas flexibles, comparados con sistemas muchos más rígidos usados en Chile y que mostraron un adecuado comportamiento durante el terremoto de Marzo de 1985.

Semejanzas en los métodos constructivos entre Colombia y México, en particular

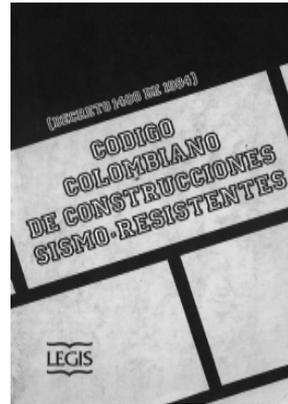


Figura 1.6. Código Colombiano de Construcciones Sismo-Resistentes CCCSR-84.

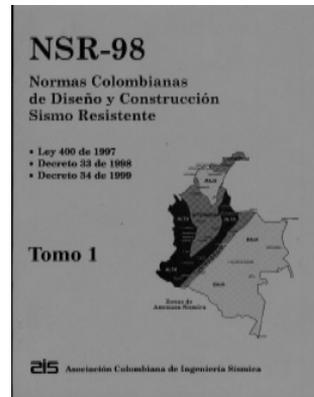


Figura 1.7. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente, NSR-98.

el uso extensivo del sistema de placa plana, así como similitudes en las condiciones del suelo de Bogotá D.C., con algunas zonas de la ciudad de México, ambas asentadas sobre un antiguo sedimento lacustre; hacen que sea muy importante el análisis cuidadoso de la experiencia mexicana para sacar de ésta el mejor provecho posible.

A principio del año 1998 se han dado a la luz pública las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo – Resistente (Ley 400 de 1997), denominadas *NSR-98* y aprobadas por medio del decreto 33 del 9 de febrero de 1998. Estas normas actualizan y reemplazan la primera normativa sismorresistente de Colombia, *CCCSR-84*. Aparte del decreto 33 de 1998 se han expedido, con fines de actualización de las normas, tres decretos reglamentarios más (Números 34 de 1999, 2.015 del 2001 y 1.379 del 2002).

