CAPÍTULO 6
RESISTENCIA DEL CONCRETO

6.1 GENERALIDADES.

Cuando se estudian los procedimientos para dosificar mezclas de concreto, se recomienda hacer mezclas de prueba, con el fin de determinar las proporciones del hormigón que cumplan con las características deseadas, para ser empleado en la construcción. Sin embargo, esto no significa, que el hormigón hecho en la obra o en la planta vaya a tener una resistencia uniforme e igual a la determinada con base en las mezclas de prueba.

Lo anterior se debe a que el concreto es un material esencialmente heterogéneo, porque sus componentes tienen características que no son constantes. No sólo son los materiales los causantes de las variaciones en la calidad del hormigón; también influye la forma de mezclarlo, su transporte y colocación en formaletas, la compactación a que se someta y el curado que se le proporcione.

Por las razones anteriores, es necesario tomar las precauciones adecuadas para que la calidad del material producido, sea aceptable. La medida final que informa sobre la calidad obtenida, es la que resulta de los ensayos de resistencia. Aquí surge otra variable, pues la forma de hacer los ensayos y la precisión de la máquina que se use, van a influir en los resultados.

La resistencia de un concreto, normalmente aumenta con la edad. Dicho aumento se produce muy rápidamente durante los primeros días posteriores a su colocación, resultando más gradual al transcurrir el tiempo, aún continuará incrementándose en una proporción más reducida durante un período de tiempo indefinido. La resistencia a compresión de un concreto a los 28 días, determinada de acuerdo con los ensayos normalizados y suponiendo que haya sido curado en forma correcta, se emplea generalmente como índice de calidad del mismo. El mejor método para obtener un criterio sobre calidad, debido a la dispersión de los resultados, es el derivado de consideraciones estadísticas.

6.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

Se ha comprobado que los resultados de los ensayos de resistencia de una misma mezcla, se agrupan siguiendo una curva de distribución normal de frecuencias (figura No. 6.1). Lo anterior ha conducido a la presentación de procedimientos estadísticos sencillos, con base en los cuales se han fijado normas para la producción y aceptación de mezclas de concreto.

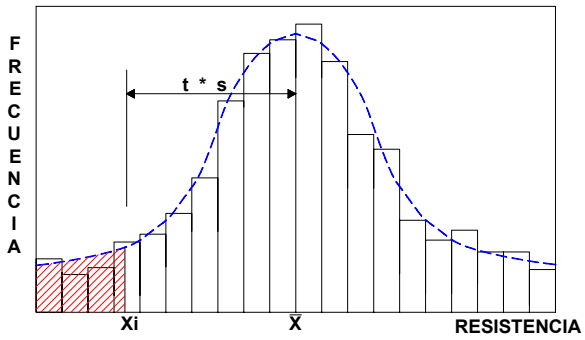


Figura No. 6.1 Curva de distribución normal. [6.9.14]

De lo anterior podemos definir entonces la ecuación general de la curva de distribución normal.

$$\overline{X} = Xi + t*S \qquad (6.1)$$

Donde:

$$\overline{X} = \sum \frac{(Xi)}{n} = \text{Valor medio.} \quad [\text{Mpa}] \text{ o } \left[\frac{kg}{cm^2}\right] \qquad (6.2)$$

$$S = \left[\frac{\sum (Xi - \overline{X})^2}{n}\right]^{\frac{1}{2}} = \text{Desviación estándar.} \qquad (6.3)$$

Xi = Valor de resistencia por debajo del cual se presenta un porcentaje dado de resultados.

t = Coeficiente sin unidades que depende del porcentaje de resultados que se presenten por debajo de Xi. En la tabla No. 6.1 se muestran algunos valores de t en función del porcentaje de resultados inferiores a Xi.

n = Número total de resultados. Para que el análisis estadístico sea confiable n≥30.

%	25	20	15	10	5	2,5	1	0,5
t	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576

Tabla No. 6. 1 Algunos valores de t.[6.9.13]

La ecuación de la curva de distribución normal también se puede expresar como:

$$\overline{X} = \frac{Xi}{1-\frac{t*V}{100}} \qquad (6.4)$$

Donde

$$V(\%) = \left(\frac{S}{\overline{X}}\right) * 100 \qquad (6.5)$$

V = Coeficiente de variación, expresado en porcentaje.

Los valores de S o de V nos indican que tan dispersos están los resultados; así, valores altos de S o V representan resultados muy alejados del promedio, lo que significa baja calidad de la mezcla y por el contrario un valor pequeño representa uniformidad en la mezcla (figura No. 6.2). En la tabla No. 6.2 se muestran valores típicos del coeficiente de variación (V) y grado de uniformidad que puede esperarse en el concreto, bajo diferentes condiciones de producción.

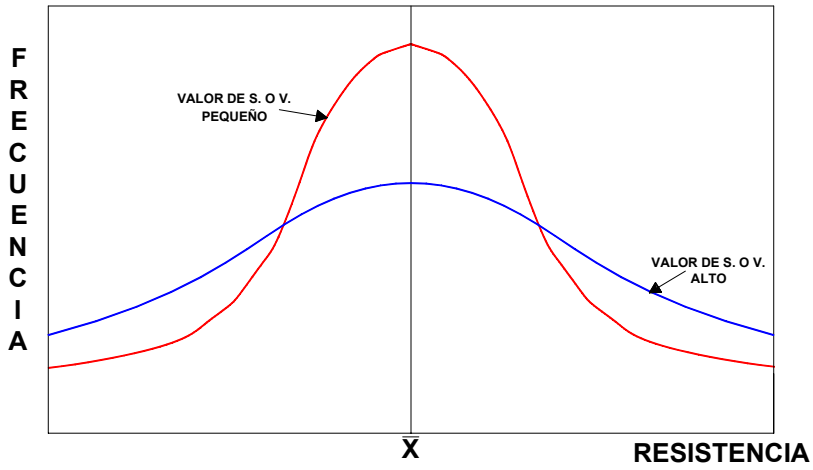


Figura No. 6.2 A menor valor de S y V, menor dispersión. Los menores valores de S y V dan una curva que representa mejor uniformidad (calidad).[6.9.14]

V (%)	UNIFORMIDAD DEL CONCRETO	CONDICIONES FRECUENTES EN QUE SE OBTIENE
0 – 5	Excelente	Condiciones de laboratorio.
5 – 10	Muy bueno	Preciso control de materiales y dosif. por masa.
10 – 15	Bueno	Buen control de los materiales y dosif. por masa.
15 – 20	Mediano	Algún control de los materiales y dosif. por masa.
20 – 25	Malo	Algún control de los materiales y dosif. por volumen.
> 25	Muy malo	Ningún control de los materiales y dosif. por volumen.

Tabla No. 6. 2 Valores de coeficiente de variación y grado de uniformidad que puede esperarse en el concreto, bajo diferentes condiciones de producción.[6.9.15]

De acuerdo a los conceptos estadísticos, se debe tener en cuenta que si un conjunto de datos sigue una distribución normal el conjunto de promedios de "m" ensayos consecutivos, también sigue una distribución normal, con el mismo valor promedio y con un coeficiente de variación y una desviación estándar igual a:

$$V_m = \frac{(V)}{(m)^{\frac{1}{2}}} \qquad (6.6)$$

ó

$$S_m = \frac{(S)}{(m)^{\frac{1}{2}}} \qquad (6.7)$$

m **=** Número de ensayos consecutivos.

Cuando el número de resultados es menor de 30 (n<30), los valores de S o de V no son enteramente confiables, y por lo tanto, con el fin de tener una mayor seguridad los valores de S o de V deben ampliarse; la NSR/98 da unos coeficientes de modificación para la desviación estándar cuando hay disponibles menos de 30 ensayos; estos coeficientes pueden ser aplicados al coeficiente de variación (V), si se trabaja con él. En la tabla No. 6.3 se presentan dichos coeficientes.

N	Coeficiente
Menos de 15	Usar Tabla No. 6.4
15	1,16
20	1,08
25	1,03
30 o Màs	1,00
* Se puede interpolar linealmente entre el número de ensayos.	

Tabla No. 6. 3 Valores del coeficiente de modificación cuando hay disponibles menos de 30 resultados.[6.9.4]

Resistencia nominal a la compresión . F'c MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión F'cr MPa *
Menos de 21 MPa	**F' c** + 7 MPa
de 21 MPa a 35 MPa	**F' c** + 8,5 MPa
más de 35 MPa	**F' c** + 10 MPa

* MegaPascal (1Mpa = 10 kg/cm^2)

Tabla No. 6.4 Resistencia promedio requerida a la compresión cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar.[6.9.4]

De acuerdo a lo anterior la ecuación general de la curva de distribución normal quedaría:

$$\overline{X} = Xi + t * S * Coeficiente \qquad (6.8)$$

o

$$\overline{X} = \frac{Xi}{1 - \frac{t * V * Coeficiente}{100}} \qquad (6.9)$$

6.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Generalmente el diseñador de estructuras, especifica en la memoria de cálculos y en los planos una resistencia a la compresión del concreto (F'c), la cual utilizó como base para calcular el dimensionamiento y el refuerzo de los diferentes elementos de una obra.

Cuando en la obra se obtenga una resistencia menor que la especificada (F'c), se disminuirá el factor de seguridad de la estructura. Para evitar esta posible disminución de seguridad y debido a que en toda obra se obtienen diferentes valores de resistencia para una misma mezcla, debido a variaciones en la dosificación, mezcla, transporte, colocación, compactación y curado del concreto; la mezcla deberá dosificarse para obtener una resistencia a la compresión promedia (F'cr) mayor que F'c.

En la práctica resulta antieconómico indicar una resistencia mínima, igual a la resistencia de diseño; puesto que de acuerdo al análisis estadístico, siempre existe la posibilidad de obtener algunos valores más bajos.

6.3.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE DOSIFICACIÓN

Con el fin de no disminuir en forma apreciable el factor de seguridad de las estructuras o encarecer innecesariamente el concreto, se acepta que un porcentaje razonable de resultados caigan por debajo de F'c. La NSR/98 da las siguientes normas para la mezcla que se vaya a producir.
Cuando una instalación productora de concreto disponga de registros de ensayos, debe calcularse su desviación estándar. La desviación estándar se debe calcular utilizando los registros de ensayo que cumplan las siguientes condiciones:

(a) Representen los materiales, procedimientos de control de calidad y condiciones similares a las esperadas en la obra y las variaciones permitidas en los registros de ensayos de los materiales y sus proporciones no deben ser más restrictivas que las permitidas en la obra.

(b) Representen un concreto producido para una resistencia o resistencias nominales, F'c, que no difieran en más de 7 MPa (MegaPascal) de la resistencia nominal especificada para la obra.

(c) Consistan en por lo menos 30 ensayos consecutivos, correspondientes cada uno de ellos al promedio de dos cilindros ensayados el mismo día, o de dos grupos de ensayos consecutivos que sumen, en total, al menos 30

De acuerdo a los criterios estadísticos tenemos:

A-) La probabilidad de tener resultados por debajo de (F'c – 3,5) Mpa, debe ser inferior al 1%.
B-) La probabilidad de que el promedio de 3 ensayos consecutivos sea menor de F'c (Mpa), debe ser inferior al 1%.

Si se define:

F'c = Resistencia a la compresión de diseño del calculista y determinada con probetas de tamaño normalizado, expresada en MPa, si no se especifica su edad, se adopta que es a los 28 días.

F'cr = Resistencia promedio a la compresión del concreto requerida para dosificar las mezclas, en MPa.

S_{RC} = Desviación estándar de valores de resistencia a la compresión, en MPa

Aplicando las anteriores normas en las fórmulas vistas en el análisis estadístico (6.8 y 6.9) se tiene:

A-) $F'cr = F'c - 3,5 + 2,33 * S_{RC} * Coeficiente$ (6.10) o $F'cr = \dfrac{F'c - 3,5}{1 - \dfrac{2,33 * V * coef.}{100}}$ (6.11)

B-) $F'cr = F'c + 1{,}34 * S_{RC} * Coeficiente$ (6.12) o $F´cr = \dfrac{F'c}{1 - \dfrac{1{,}34 * V * coef.}{100}}$ (6.13)

C-) Cuando no se tengan registros de ensayos para calcular la desviación estándar (o el coeficiente de variación) o cuando el número de resultados sea menor de 15, el valor de F'cr deberá determinarse de acuerdo a la tabla No. 6.4

De acuerdo a lo anterior tenemos:

* De las tres normas se debe tomar el mayor valor entre el primero y el segundo criterio (fórmulas 6.10 o 6.11 y 6.12 o 6.13), teniendo como tope máximo o límite el tercer criterio (tabla No. 6.4).

* Cuando no hay datos o este número es menor de 15, se utiliza solamente el tercer criterio.

* Cuando el número de datos está entre 15 y 30, se usa el valor de S o V pero multiplicado por los coeficientes dados en la tabla No. 6.3, teniendo en cuenta que se puede interpolar linealmente.

Ejemplo:

Calcular el valor de resistencia a la compresión de dosificación de una mezcla (F'cr), si se tienen los siguientes datos:

$F'c$ = 21 MPa (MegaPascal)
S_{RC} = 3 MPa para n = 25 datos

Solución:
Para n = 25 datos el coeficiente correspondiente es 1,03

Criterios:
A-) $F'cr = F'c - 3{,}5 + 2{,}33 * S_{RC} * coeficiente$
$F'cr = 21 - 3{,}5 + 2{,}33 * 3 * 1{,}03 = 24{,}70 MPa$

B-) $F'cr = F'c + 1{,}34 * S_{RC} * coeficiente$
$F'cr = 21 + 1{,}34 * 3 * 1{,}03 = 25{,}14\ MPa$

C-) Como $F'c = 21\ MPa$ ---> $F'cr = F'c + 8{,}5 = 29{,}5\ MPa$

De los criterios A-) y B-), el mayor valor es 25,14 Mpa y éste no supera a 29,5 Mpa.
Luego, $f'cr = 25{,}14\ Mpa.\ (251{,}4\ kg/cm^2)$

En la figura No. 6.3 se presenta un resumen gráfico con la solución a los criterios planteados.

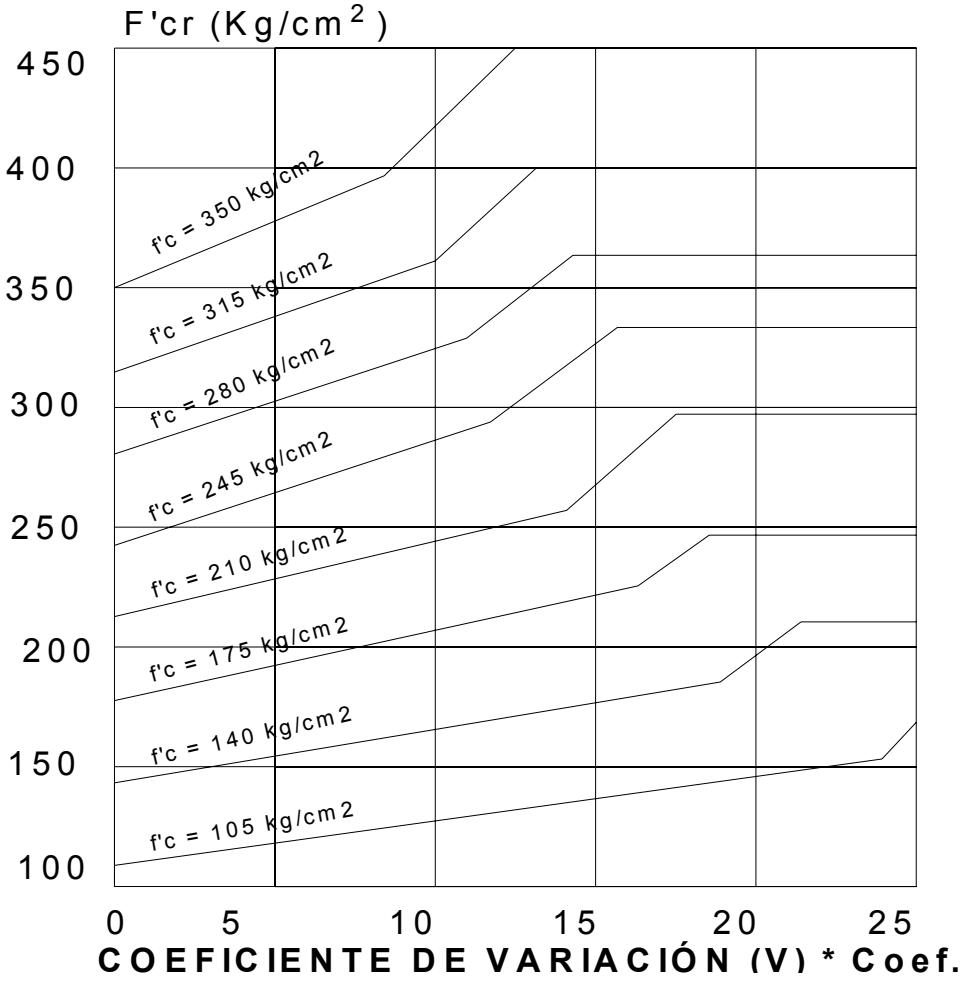


Figura No. 6.3 - Resistencia promedio a la compresión del concreto requerida para dosificar las mezclas (F'cr), para diferentes valores de resistencia a la compresión de diseño del calculista (F'c) y de coeficientes de variación (V).

6.3.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

El ensayo con el cual se mide la resistencia a la compresión del concreto, está establecido en las normas NTC 550 y 673.

Se emplean moldes cilíndricos de 15 cm de diámetro por 30 cm de longitud. Para cada edad se deben ensayar como mínimo 2 cilindros y trabajar con el valor promedio. Se deben aceitar las paredes del molde; al llenar éste se debe lograr una buena compactación, la cual puede realizarse con varilla (método apisonado) si el asentamiento es mayor a 7,5 cm ó con vibrador (método vibrado) si el asentamiento es menor a 2,5 cm, para asentamientos entre 2,5 y 7,5 cm puede usarse varilla o vibrador preferiblemente el método empleado en la obra.

La varilla compactadora debe ser de acero estructural, cilíndrica, lisa, de 16 mm de diámetro y de longitud aproximada de 600 mm, la punta debe ser redondeada. Los vibradores pueden ser internos o externos; los vibradores internos pueden ser de eje rígido o flexible, preferiblemente accionados con motores eléctricos, la frecuencia de vibración debe ser de 7000 rpm o mayor, el diámetro exterior o dimensión lateral del elemento vibratorio no debe ser menor de 19 mm, ni mayor de 38 mm; La longitud del eje sumada a la del elemento vibrante debe ser como mínimo 400 mm. Los vibradores externos pueden ser de mesa o de plancha, la frecuencia de vibración debe ser de 3600 rpm o mayor y su construcción debe ser tal que el molde quede bien ajustado, se debe usar un tacómetro para controlar la frecuencia de vibración.

Los cilindros se llenan con hormigón en capas de igual volumen aproximadamente, el número de capas depende del método de compactación escogido, así:

Varillado ⟶ 3 capas
Vibrado ⟶ 2 capas

En el método apisonado cada capa debe compactarse con 25 golpes, los cuales deben distribuirse uniformemente en toda la sección transversal del molde. La capa del fondo debe compactarse en toda su profundidad, al compactar las capas superior e intermedia la varilla debe penetrar aproximadamente 25 mm en la capa inmediatamente inferior. Si al retirar la varilla quedan huecos en el cilindro, éstos deben cerrarse golpeando suavemente en las paredes del molde.

La vibración se debe transmitir al cilindro el tiempo suficiente para lograr la adecuada compactación del hormigón, pues un exceso de vibrado puede causar segregación. El molde se debe llenar y vibrar en dos capas aproximadamente iguales, todo el concreto para cada capa se debe colocar en el molde antes de iniciar su vibrado.

La duración del vibrado depende de la manejabilidad del concreto y de la efectividad del vibrador, se considera suficiente el vibrado, cuando el hormigón presente una superficie relativamente lisa. En la vibración interna en cada capa se debe introducir el vibrador en tres sitios diferentes; al compactar, el vibrador no debe tocar el fondo o las paredes del molde y debe penetrar 25 mm aproximadamente en la capa inferior. El vibrador se debe retirar suavemente de modo que no se formen bolsas de aire. En la vibración externa debe tenerse el cuidado de que el molde esté rígidamente unido a la superficie o elemento vibrante.

Los cilindros deben referenciarse. Los moldes con el concreto, se deben colocar durante las primeras 16 horas como mínimo y máximo 24 horas, sobre una superficie rígida, libre de vibración u otras perturbaciones. Los cilindros se deben almacenar en condiciones tales que se mantenga la temperatura entre 16 ^{o}C y 27 ^{o}C y se prevenga la pérdida de humedad de los mismos. Los cilindros para verificar diseño o para control de calidad, deben removerse de los moldes después de 20 ± 4 horas de haber sido moldeados y deben almacenarse en condiciones de humedad tales que siempre se mantenga agua libre en todas sus superficies, a temperatura permanente de 23 ± 2 ^{o}C hasta el momento del ensayo. Los cilindros no deben estar expuestos a goteras o corrientes de agua, si se desea almacenamiento bajo agua ésta debe estar saturada de cal.

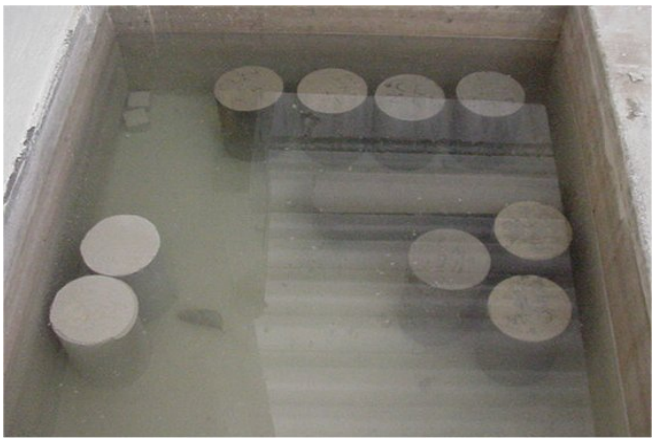


Foto 6.1. Almacenamiento del concreto bajo agua saturada con cal.

Los cilindros que se toman para conocer el tiempo mínimo de desencofrado, el tiempo para dar al servicio una estructura o para hacer el control de curado en las obras, se deben almacenar dentro o sobre la estructura, tan cerca como sea posible al sitio donde se esté usando el concreto y deben recibir la misma protección que la dada a las partes de la estructura que representan y los moldes deben removerse simultáneamente con el retiro de los encofrados no portantes. Para el ensayo de compresión deben sumergirse en agua los cilindros por 24$\pm$4 horas inmediatamente antes de la rotura para asegurar una condición uniforme de humedad. Los cilindros se deben probar a la edad especificada por el calculista, aunque se recomienda probar parejas de cilindros antes y después de la edad especificada con el fin de determinar como ha sido el desarrollo de resistencia.

Antes de probar los cilindros se debe comprobar que sus bases sean planas, las bases de los cilindros que no sean planas dentro de 0,005 mm deben refrentarse. El refrentado se puede hacer con mortero de azufre o yeso de acuerdo con la norma NTC 504. Los cilindros deben ensayarse tan pronto como sea posible, en estado húmedo; se llevan a la máquina de ensayo y se aplica carga a una velocidad constante (1,4 a 3,5 kg/cm^2/s) hasta que el cilindro falle.



Foto 6.2. Refrentado de cilindros de concreto (mortero de azufre y almohadillas de neopreno).

La resistencia a la compresión se calcula así:

$$RC = P/A \qquad (6.14)$$

Donde:

P = Carga máxima aplicada en kg.
A = Área de la sección transversal en cm^2.
RC= Resistencia a la compresión del cilindro en kg/cm^2, con aproximación a 1 kg/cm^2.
$10kg/cm^2 \approx 1Mpa$

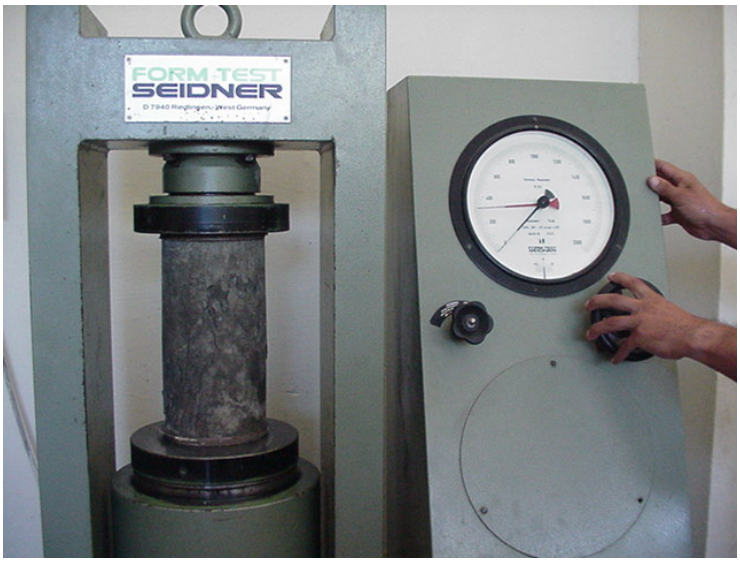


Foto 6.3. Ensayo de Resistencia a la Compresión del Concreto.

Adicional al valor de la resistencia a la compresión se debe reportar el número de identificación o referencia del cilindro, su edad, tipo de fractura y defectos tanto del cilindro como del refrentado.

La resistencia a la compresión del concreto se debe determinar como el promedio de al menos dos cilindros probados al mismo tiempo.

6.4 RESISTENCIA A LA TENSIÓN

El concreto posee muy baja resistencia a la tensión y por lo tanto esta propiedad no se tiene en cuenta en el diseño de estructuras normales. Sin embargo, la tensión tiene importancia en el agrietamiento del concreto debido a la restricción de la contracción inducida por el secado o por disminución de la temperatura. Los concretos preparados con agregados livianos, se encogen considerablemente más que los normales y por lo tanto la resistencia a la tensión puede ser tenida en cuenta en el diseño de la estructura correspondiente.

La resistencia a la tensión es difícil de medir por medio de ensayos directos, debido a las dificultades para montar las muestras y las incertidumbres que existen sobre los esfuerzos secundarios inducidos por los implementos que sujetan las muestras.

Para evitar este problema existe un método indirecto (norma NTC 722), en el cual la resistencia a la tensión se determina cargando a compresión el cilindro estándar de 15 cm de diámetro por 30 cm de longitud, a lo largo de dos líneas axiales diametralmente opuestas; los listones diametrales de apoyo deben ser dos tiras de cartón o de madera laminada, libres de imperfecciones, de 3 mm de espesor y 25 mm de ancho aproximadamente. La elaboración y curado de los cilindros se realiza en forma similar al ensayo de resistencia a la compresión; la velocidad de aplicación de la carga debe ser de 7 a 15 kg/cm^2/min. La resistencia a la tensión indirecta se calcula con la siguiente ecuación:

$$RT = \frac{2P}{\pi LD} \qquad (6.15)$$

Donde:

RT = Resistencia a la tracción o tensión indirecta de un cilindro en (kg/cm^2), con aproximación a 1 kg/cm^2.
P = Carga máxima aplicada (kg.).
L = Longitud del cilindro (cm).
D = Diámetro del cilindro (cm).



Foto 6.4. Esquema del Ensayo de Resistencia a la Tensión indirecta.

Para cada edad se deben ensayar como mínimo 2 cilindros y trabajar con valores promedio.

En caso de no poderse realizar el ensayo, la resistencia a la tensión puede tomarse aproximadamente como el 10% de la resistencia a la compresión.

6.5 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

La resistencia a la flexión de un concreto es baja en comparación con su resistencia a la compresión, pero muy superior a su resistencia en tracción pura.

Este parámetro es aplicado en estructuras tales como pavimentos rígidos; debido a que los esfuerzos de compresión que resultan en la superficie de contacto entre las llantas de un vehículo y el pavimento son aproximadamente iguales a la presión de inflado de las mismas, la cual en el peor de los casos puede llegar a ser de 5 o 6 kg/cm^2; este esfuerzo de compresión sobre un pavimento de concreto hidráulico resulta sumamente bajo con relación a la resistencia a la compresión del concreto que normalmente varía entre 150 y 350 kg/cm^2 en nuestro medio.

Por lo tanto, no es la resistencia a la compresión el factor determinante de la calidad del concreto para pavimentos, sino la resistencia a la flexión, por el paso de los vehículos y por diferencias de temperatura un lado de la losa estará sometida a tensión y el otro lado a compresión, siendo cambiables estos esfuerzos. Los esfuerzos de flexión podrían ser atendidos por medio de refuerzo, pero esto sería antieconómico debido a que se tendría que utilizar refuerzo en dos capas. En la práctica lo que se hace es diseñar el espesor del pavimento en forma tal que los esfuerzos de flexión, causados por el paso de los vehículos y la diferencia de temperatura, sean inferiores a la capacidad máxima a flexión de las placas. Es claro entonces que para el diseño de pavimentos de concreto la característica importante es la resistencia a la flexión del concreto o también llamada "módulo de rotura".

6.5.1 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE DOSIFICACIÓN

Lo indicado anteriormente sobre la resistencia de diseño a la compresión es aplicable a la flexión. Por lo tanto, la mezcla deberá dosificarse para obtener un módulo de rotura promedio mayor que la resistencia a la flexión de diseño, con el fin de no disminuir el factor de seguridad de la estructura (la vida útil del pavimento).

Luego:

F'r = Resistencia a la flexión o módulo de rotura de diseño del calculista en Mpa o kg/cm^2. Si no se especifica la edad se asume que es a los 28 días.

F'rr= Resistencia promedio a la flexión del concreto requerida para dosificar las mezclas en Mpa o kg/cm^2.

S_{RF} =Desviación estándar de valores de resistencia a la flexión, en MPa o kg/cm^2.

Los valores de resistencia a la flexión de una mezcla de concreto se agrupan de acuerdo a una curva de distribución normal; con el fin de no disminuir la vida útil del pavimento ni encarecer la mezcla, el Instituto Colombiano de Productores de Cemento (ICPC) recomienda que sólo un 20% de valores sean menores de F'r. De acuerdo con lo anterior, al reemplazar este criterio en las fórmulas vistas en el análisis estadístico (6.8 y 6.9) tenemos:

A-) En función de la desviación estándar:

$F'rr = F'r + t * S_{RF} * coeficiente$

Para un 20% de valores inferiores a F'r, t es 0,842

Luego:

$F'rr = F'r + 0,842 * S_{RF} * coeficiente$ (6.16)

O en función del coeficiente de variación (V en %)

$$F´rr = \frac{F'r}{1 - \frac{0,842 * V * coef.}{100}} \quad (6.17)$$

Los valores del coeficiente son los mismos dados en la tabla No. 6.3 y depende del número de datos (n).

B-) Cuando no hay datos o los datos son muy pocos (menos de 15) o el grado de uniformidad de la mezcla producida es malo y está representada por valores de S y V altos, el valor de F'rr se recomienda tomarlo como:

$F'rr = 1,20 * F'r$ (6.18)

Es decir, que se debe tomar el menor valor de los dos criterios antes expuestos.

Ejemplo:

Calcular el valor de resistencia a la flexión de dosificación de una mezcla (F'rr), si se tienen los siguientes datos:

F'r = 4 Mpa
S_{RF} = 0,37 Mpa para n = 20 datos

Solución:

Para n = 20 datos el coeficiente correspondiente es 1,08

A-) $F'rr = F'r + 0,842 * S_{RF} * coef.$
$F'rr = 4 + 0,842 * 0,37 * 1,08 = 4,34 Mpa$

B-) F*'rr = 1,20 * F'r*
*F'rr = 1,20 * 4 = 4,8 Mpa*

Luego, el módulo de rotura de dosificación de la mezcla es: F*'rr = 4,34 Mpa (43,4* kg/cm^2)

6.5.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

El método más empleado para medir la resistencia a la flexión es usando una viga simplemente apoyada con carga en los tercios de la luz, aunque en algunas partes se emplea el método de la viga en voladizo o el de la viga simplemente apoyada con carga en el punto medio; los resultados obtenidos difieren con el método empleado.

El ensayo de la viga simplemente apoyada con carga en los tercios de la luz se realiza de acuerdo con la norma NTC 1377 o ASTM C31 y ASTM C78. El equipo empleado en el ensayo es el siguiente:

- *Probetas para ensayo:* vigas rectangulares elaboradas y endurecidas con el eje mayor en posición horizontal. Los moldes deben cumplir los siguientes requisitos:

Longitud $\geq$ 3 profundidad en posición de ensayo + 5 cm.
Ancho / profundidad (en la posición en que se elabora) $\leq$1,5
Dimensión menor de la sección recta $\geq$3 tamaño máximo del agregado (para TM>5cm)

Los moldes más empleados tiene una sección de 15,2 * 15,2 cm y una longitud de 55,8 cm y se usará para concretos con agregado grueso de tamaño máximo $\leq$ 5 cm. Se pueden usar moldes de otras dimensiones pero que cumplan los requisitos antes vistos.

- *Varilla compactadora :* debe ser de acero estructural, cilíndrica, lisa, de 16 mm de diámetro y de longitud aproximada de 600 mm, la punta debe ser redondeada.

- *Vibrador:* puede ser vibración interna o externa, se debe cumplir con los mismos requisitos que para el ensayo de resistencia a la compresión.

La utilización de la varilla o el vibrador para compactar, se hace de acuerdo a los criterios del ensayo de resistencia a la compresión, a menos que las especificaciones de la obra indiquen lo contrario.

Asentamiento > 7,5 cm se debe utilizar varilla.
Asentamiento < 2,5 cm se debe utilizar vibrador.
Asentamiento entre 2,5 y 7,5 cm se puede utilizar varilla o vibrador, preferiblemente el método empleado en la obra.

Los moldes se deben aceitar y luego se procede a llenarlos por capas de acuerdo a la tabla No. 6.5.

ALTURA DEL MOLDE (cm)	FORMA DE COMPACTAR	No. DE CAPAS	ALTURA APROX. DE CADA CAPA
≤ 20	Varilla	2	Mitad de la altura
> 20	Varilla	3 o más	10 cm
≤ 20	Vibrador	1	Toda la altura
> 20	Vibrador	2 o más	20 cm

Tabla No. 6. 5 Número de capas requeridas en la elaboración de las vigas.[6.9.7]

Cada capa se compactará de la siguiente forma:

-Varilla: se dará un golpe por cada 14 cm^2 de sección horizontal.

-Vibrador: la duración requerida de la vibración es función de la trabajabilidad del concreto y de la efectividad del vibrador. Usualmente la vibración debe suspenderse inmediatamente después de que la superficie del concreto se haga relativamente suave (comience a fluir la pasta); se debe tener cuidado de no sobrevibrar porque produce segregación.

En la vibración interna se coloca el vibrador cada 15 cm a lo largo del eje longitudinal y se penetra ligeramente en la capa inferior; cuando las probetas tienen un ancho mayor de 15 cm debe introducirse el vibrador alternadamente a lo largo de 2 líneas de acción. En la vibración externa el molde debe colocarse rígidamente unido a la superficie vibrante.

Las vigas deben referenciarse. Los moldes con el hormigón, se deben colocar durante las primeras 16 horas como mínimo y máximo 24 horas, sobre una superficie rígida, libre de vibración u otras perturbaciones. Las vigas se deben almacenar en condiciones tales que se mantenga la temperatura entre 16 ^oC y 27 ^oC y se prevenga la pérdida de humedad de las mismas.

Las vigas para verificar diseño o para control de calidad deben removerse de los moldes después de 20±4 horas de haber sido moldeadas y deben almacenarse en condiciones de humedad tales que siempre se mantenga agua libre en todas sus superficies a temperatura permanente de 23±2 ^oC hasta el momento del ensayo. Las vigas no deben estar expuestas a goteras o corrientes de agua, si se desea almacenamiento bajo agua ésta debe estar saturada de cal.

Las vigas que se elaboran para conocer el tiempo en que se pueda dar al servicio el pavimento o para hacer el control de curado en la obra, se deben almacenar sobre la losa o tan cerca como sea posible al sitio donde se esté usando el concreto y deben recibir la misma protección. Para el ensayo de flexión deben sumergirse en agua las vigas por 24±4 horas inmediatamente antes de la rotura para asegurar una condición uniforme de humedad.

Las vigas se deben probar a la edad especificada por el calculista, aunque se recomienda probar parejas de vigas antes y después de la edad especificada con el fin de determinar como ha sido el desarrollo de resistencia.



Foto 6.5. Ensayo de Resistencia a la flexión.

Las vigas deben ensayarse tan pronto como sea posible, en estado húmedo; se llevan a la máquina de ensayo, se giran 90^o respecto a la posición de elaboración y se aplica carga a una velocidad constante (8,8 a 12,4 kg/cm^2/min.), hasta que la viga falle.

La resistencia a la flexión se calcula así:

A-) Si la falla ocurre dentro del tercio central, el módulo de rotura se determina con la fórmula:

$$MR = \frac{P * L}{b * d^2} \qquad (6.19)$$

Siendo:

MR = Módulo de rotura de la viga (kg/cm^2).
P = Carga máxima aplicada en (kg.).
L = Distancia entre apoyos (cm).
b = Ancho de la viga en la posición de ensayo, en la sección de falla (cm).
d = Altura de la viga en la posición de ensayo, en la sección de falla (cm).

B-) Si la falla ocurre por fuera del tercio central, pero no está separada de él por más de una longitud equivalente al 5% de la luz libre o distancia entre apoyos, el módulo de rotura se determina con la ecuación siguiente:

$$MR = \frac{3 * P * a}{b * d^2} \qquad (6.20)$$

Siendo

MR = Módulo de rotura (kg/cm^2).
P = Carga máxima aplicada en kg.
a = Distancia entre la sección de falla y el apoyo más próximo medido sobre el eje longitudinal de la cara inferior de la viga en cm.
b = Ancho de la viga en la posición de ensayo, en la sección de falla (cm).
d = Altura de la sección en la posición de ensayo, en la sección de falla (cm).

C-) Si la falla ocurre por fuera del tercio medio de la viga y a una distancia mayor del 5% de la distancia entre apoyos, se debe descartar el resultado del ensayo.

La resistencia a la flexión del concreto se debe determinar como el promedio de al menos dos vigas probadas al mismo tiempo y con una aproximación a 0,1 kg/cm^2.
10kg/cm^2 ≈ 1Mpa.

6.6 CORRELACIONES ENTRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN Y LAS RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN Y TENSIÓN

El módulo de rotura presenta valores que varían entre un 10% y un 20% de la resistencia a la compresión. Una relación aproximada, que puede utilizarse cuando no se disponga de ensayos de flexión, es la siguiente:

$$MR = k\,(RC)^{1/2} \qquad (6.21)$$

Donde:

MR = Módulo de rotura estimado para el concreto (kg/cm^2).
RC = Resistencia a la compresión obtenida en el concreto (kg/cm^2).
k = Constante que varía normalmente entre 2,0 y 2,7, para resistencias en kg/cm^2 a 28 días.

La relación entre el módulo de rotura y la resistencia a la tensión indirecta es de tipo lineal.

Para materiales del área de Popayán (agua potable, cemento del Valle y agregados de la zona) se han encontrado las siguientes correlaciones, las cuales se deben ajustar periódicamente.

Arena y grava de río:

$MR_{28D} = 2{,}20 * (RC_{28D})^{1/2}$ *en* kg/cm^2; $r = 0{,}86$ (6.22)
$MR_{28D} = 15{,}03 + 0{,}90\,RT_{28D}$ *en* kg/cm^2; $r = 0{,}98$ (6.23)
r = Coeficiente de correlación

Arena de río y triturado:

$MR_{28D} = 2{,}48 * (RC_{28D})^{1/2}$ *en* kg/cm^2; $r = 0{,}88$ (6.24)
$MR_{28D} = 12{,}25 + 1{,}03\,RT_{28D}$ *en* kg/cm^2; $r = 0{,}99$ (6.25)

6.7 EVALUACIÓN Y ACEPTACIÓN DEL CONCRETO

Según la NSR/98; las muestras para las pruebas de resistencia correspondientes para cada clase de concreto, deben estar conformadas cuando menos por una pareja de cilindros tomados no menos de una vez por día, ni menos de una vez por cada $40m^3$ de concreto o una vez por cada $200m^2$ de área de losas o muros. Como mínimo debe tomarse una pareja de muestra de concreto de columnas por piso. De igual manera como mínimo debe tomarse una pareja de muestras por cada 50 bachadas de cada clase de concreto.

Si en una determinada obra, el volumen total de concreto es tal que la frecuencia de los ensayos, da lugar a menos de 5 ensayos de resistencia para una misma clase de concreto, las muestras deben tomarse de por lo menos 5 mezclas seleccionadas al azar, o en cada mezcla si se usan menos de 5.

Cuando la cantidad total de una clase de concreto sea menor de $10m^3$, pueden suprimirse las pruebas de resistencia si, a juicio del Supervisor Técnico, existe suficiente evidencia de que la resistencia que se va a obtener es satisfactoria.

Un ensayo de resistencia debe ser el resultado del promedio de resistencia de 2 cilindros tomados de una misma mezcla y ensayados a los 28 días, o a la edad especificada en caso de que sea diferente de 28 días.

El nivel de resistencia para cada clase de concreto se considera satisfactorio si cumple simultáneamente los siguientes requisitos:

A-) Que los promedios aritméticos de todos los conjuntos de tres resultados consecutivos de ensayos de resistencia a la compresión, igualen o excedan el valor especificado para F'c, y

B-) Que ningún resultado individual de las pruebas de resistencia a la compresión (promedio de al menos dos cilindros), sea inferior a F’c en más de 3,5 MPa.

Si no se cumple cualquiera de los dos requisitos, deben tomarse las medidas necesarias para asegurar que la capacidad de carga de la estructura no se esté comprometiendo.

Si se confirma que el concreto puede ser de baja resistencia, se apelará al ensayo sobre núcleos extraídos de la zona en duda, de acuerdo con la norma NTC 889 o norma ASTM C 42. En tal caso, deben tomarse 3 núcleos por cada ensayo de resistencia menor a F'c-3,5 (Mpa). Si el concreto en servicio va a estar seco, los núcleos se secan al aire durante siete días antes del ensayo y deben probarse secos. Si durante el servicio el hormigón va a estar húmedo, los núcleos deben sumergirse en agua por lo menos durante 40 horas y ensayarse húmedos.

El concreto de la zona representada por los núcleos es estructuralmente adecuado, si ningún núcleo tiene resistencia menor al 75% de F'c y si su promedio es por lo menos el 85% de F'c. Si lo anterior no se cumple y la seguridad estructural permanece en duda, se puede ordenar pruebas de carga en la parte dudosa de la estructura.

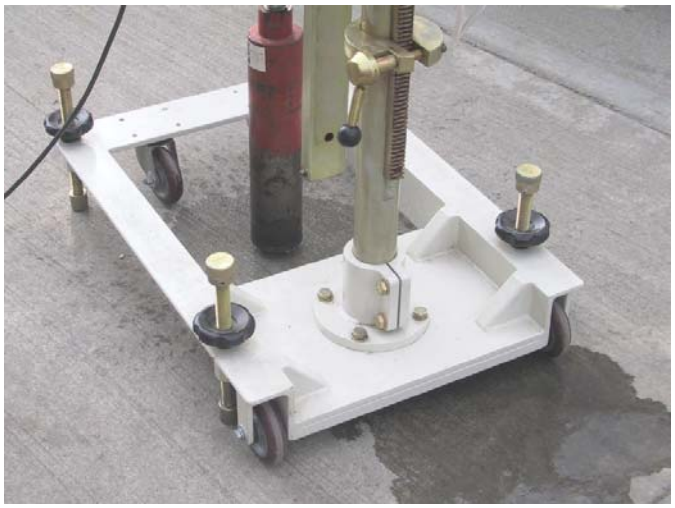


Foto 6.6. Toma de núcleos.



Figura 6.7. Núcleo extraído.

En el caso de resistencia a la flexión, la mezcla se dosifica para que un 80% de los resultados de ensayo den módulos de rotura por encima del de diseño (F'r), lo cual implica que muy probablemente al ejecutar la obra, se va a obtener aproximadamente un 20% de ensayos por debajo de dicho valor. Ahora bien, si la diferencia de los resultados de uno de éstos ensayos y el módulo de rotura de diseño estructural (F'r) es muy poca no hay ningún problema, pero cuando la diferencia es grande puede ponerse en peligro la estabilidad o la duración del pavimento. A éste respecto y aunque las normas no lo dicen claramente, se recomienda que se acepte el concreto cuyo módulo de rotura sea al menos el 80% del módulo de rotura de diseño (F'r), siempre que el resultado promedio de cinco ensayos consecutivos lo supere o al menos lo iguale; en caso de que no se cumplan éstas condiciones debe revisarse todo el proceso de ensayo o comprobarse la calidad del concreto tomando núcleos o con ensayos no destructivos.

Cuando los cilindros estándar o las vigas normalizadas, no dan la resistencia que se requiere y la calidad del hormigón permanece en duda y ante la dificultad de extraer núcleos, existen otras alternativas para determinar la resistencia del concreto endurecido, son los ensayos no destructivos.

Uno de los ensayos no destructivos que ha encontrado mayor aceptación práctica, dentro de alcances limitados, es el martillo de rebote o martillo de impacto o esclerómetro. Este instrumento mide el rebote de un cilindro de acero empujado por un resorte después que ha actuado y golpea una superficie de concreto, la lectura del rebote da una indicación de la resistencia del concreto. Deben tomarse varias precauciones al estimar la resistencia, ya que al rebote lo afecta el tipo de agregado, el grado de humedad del concreto, el tamaño y la firmeza de apoyo de la muestra, lo parejo de la superficie y la edad del concreto. Para ser más útil, el martillo debe calibrarse para el concreto particular sobre el que se va a usar. Se puede emplear como comparador de resistencias entre dos concretos similares.



Foto 6.8. Martillo de rebote o Esclerómetro.

Para el martillo de rebote o esclerómetro que se tiene en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca y con materiales del área de Popayán se tienen las siguientes ecuaciones de calibración (las cuales deben ajustarse periódicamente):

$RC = 10{,}42 * LE_H - 85{,}6 \quad r = 0{,}88$ (6.26)

$RC = 11{,}80 * LE_V - 96{,}8 \quad r = 0{,}93$ (6.27)

Donde:

RC = Resistencia a la compresión estimada del concreto en kg/cm^2.
LE$_H$ = Lectura en el esclerómetro en posición horizontal.
LE$_V$ = Lectura en el esclerómetro en posición vertical (hacia abajo).
r = Coeficiente de correlación.

Otra prueba no destructiva es la del pulso ultrasónico donde se mide la velocidad de onda longitudinal en el concreto; no existe una relación única entre esta velocidad y la resistencia del concreto, pero en condiciones específicas, las dos cantidades si tienen una relación directa.

El factor común es la masa unitaria del concreto, un cambio en la masa unitaria produce un cambio en la velocidad de pulso; por lo tanto, una disminución en la masa unitaria ocasionado por un aumento en la relación agua / cemento reduce tanto la resistencia a la compresión del concreto como la velocidad de un pulso transmitido a través de él. La velocidad de onda no se determina directamente, sino que se calcula a partir del tiempo que tarda un pulso en recorrer una distancia medida. Este pulso ultrasónico se obtiene al aplicar un rápido cambio de potencial a partir de un impulsor transmisor a un transductor de cristal piezo-eléctrico, que emite vibraciones a su frecuencia fundamental. El transductor está en contacto con el concreto, de modo que las vibraciones viajan a través de él y son recogidas por otro transductor en contacto con la cara opuesta.

Normalmente se pueden probar concretos de 0,10 a 2,50 m de espesor, sin embargo, se han efectuado algunas pruebas en concretos con espesores hasta de 15 m. La técnica de velocidad de pulso ultrasónico se usa como medio de control de calidad en productos que supuestamente están elaborados de concretos semejantes; en casos prácticos conviene calibrar el aparato, estableciendo la relación entre la resistencia y la velocidad de pulso para los materiales utilizados.



Foto 6.9. Ensayo de velocidad de onda.

6.8 FACTORES QUE AFECTAN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO

6.8.1 TIPO DE CEMENTO

Es lógico pensar que las características del cemento empleado tienen una gran influencia en la resistencia final alcanzada por el concreto, ya que el cemento es un material "activo" en las mezclas.

Se ha demostrado en diversas investigaciones y en la práctica constructiva misma, que existe una estrecha correlación entre la resistencia de un cemento determinado de acuerdo con un proceso normalizado (norma NTC 220) y la resistencia de los concretos preparados con dicho cemento; de ahí que distintas marcas de cemento, aún de un mismo tipo, no deban ser intercambiadas sin un cuidadoso análisis del efecto que dicho cambio pueda tener sobre las propiedades del concreto endurecido.

La resistencia que puede producir un determinado cemento depende fundamentalmente de su composición química; por ejemplo, con un cemento con alto contenido de C_3S se obtendrán buenas resistencias y en un tiempo relativamente corto, acompañadas por un desprendimiento de calor relativamente alto durante el endurecimiento, en tanto que un cemento rico en C_2S producirá altas resistencias pero en un tiempo relativamente largo, con un moderado calor de hidratación, lo cual conlleva a una mejor resistencia a los ataques químicos.

La finura a la cual se haya molido el cemento también influye en las características del concreto, ya que los cementos más finos ganan resistencia más rápidamente que los gruesos, pero en cambio producen mayor retracción al endurecer y liberan más calor y más rápidamente, durante la hidratación.

6.8.2 TIPOS DE AGREGADOS

Los concretos que tengan agregados angulosos o rugosos son generalmente más resistentes que otros de igual relación agua / cemento que tengan agregados redondeados o lisos; sin embargo, para igual contenido de cemento, los primeros exigen más agua para no variar la manejabilidad y por lo tanto el efecto en la resistencia no varía apreciablemente. Sin embargo, como es lógico la calidad del agregado afecta el desarrollo de resistencia.

6.8.3 TIPO DE AGUA DE MEZCLA

Se ha dicho usualmente que el agua que se puede beber y que no tenga color, olor y sabor apreciable puede usarse en mezclas de concreto. El agua utilizada en una mezcla de concreto debe estar limpia y libre de cantidades perjudiciales de: aceite, ácidos, álcalis, sales, materiales orgánicos u otras sustancias que puedan ser dañinas para el concreto o el refuerzo. El agua de mezcla para el concreto preesforzado o para el concreto que vaya a contener elementos de aluminio embebidos, o el agua debida a la humedad libre de los agregados, no debe contener cantidades perjudiciales de ión cloro.

El agua impotable no debe utilizarse en el concreto a menos que se cumplan las siguientes condiciones:

A-) La dosificación debe estar basada en mezclas de concreto que utilice agua de la misma fuente.
B-) Los cubos para ensayos de morteros hechos con agua impotable de mezcla, deben tener una resistencia a la compresión a los 7 y 28 días de edad, igual o mayor al 90% de la resistencia a la compresión de probetas similares hechas con agua potable.

La comparación de los ensayos de resistencia debe hacerse sobre morteros idénticos, excepto para el agua de mezcla, preparados y ensayados de acuerdo con la norma NTC 220.

El agua con una salinidad de 3,5% produce una reducción de resistencia a los 28 días del 12%, aumentando la salinidad a 5% la reducción de resistencia es del orden del 30%. La presencia de sales produce oxidación del refuerzo, por lo tanto no debe usarse agua salada en concreto reforzado y preesforzado.

6.8.4 RELACION AGUA / CEMENTO (A/C)

Duff Abrams, enunció la siguiente ley que lleva su nombre: "Dentro del campo de las mezclas plásticas, la resistencia a los esfuerzos mecánicos, así como las demás propiedades del concreto endurecido, varían en razón inversa a la relación agua / cemento".

Lo que significa que a menor relación agua / cemento (A/C), mayor resistencia, más durabilidad y en general mejoran todas las propiedades del concreto endurecido. La ley de Abrams se expresa matemáticamente como:

$$R = \frac{k_1}{k_2^{A/C}} \qquad (6.28)$$

Donde:

R = Resistencia a los esfuerzos mecánicos.
A/C = Relación agua / cemento.
k1 y k2 = Son valores que dependen de la calidad del cemento, edad del concreto, sistema de curado y tipo de agregados.

Para materiales del área de Popayán (agua potable, cemento del Valle y agregados de la zona) se han encontrado las siguientes correlaciones (éstas ecuaciones deben de ajustarse con periodicidad):

- Arena y grava de río:

$RC_{7D} = (815{,}58) / (37{,}48)^{A/C}$ *en kg/cm²* ; $r = 0{,}96$ (6.29)
$RC_{28D} = (889{,}61) / (19{,}21)^{A/C}$ *en kg/cm²* ; $r = 0{,}97$ (6.30)

- Arena de río y triturado:

$RC_{7D} = (777{,}28) / (32{,}77)^{A/C}$ *en kg/cm²* ; $r = 0{,}95$ (6.31)
$RC_{28D} = (734{,}88) / (10{,}95)^{A/C}$ *en kg/cm²* ; $r = 0{,}89$ (6.32)

La firma SOLINGRAL LTDA encontró para materiales procedentes del valle del río Medellín y de diferentes regiones de Antioquia, Valle, Choco, Caldas y la Costa Atlántica y cementos: El Cairo, Nare, Argos y Caribe, la siguiente relación:

$RC_{28D} = (985) / (14{,}3)^{A/C}$ *en kg/cm²* 6.9.13 (6.33)

El DECRETO 1400 presenta unos valores recomendados, para el caso que no se tenga una idea del comportamiento de los materiales con los que se está trabajando y son los siguientes:

Resistencia a la compresión (kg/cm²)	A/C Concreto sin aire incluido	A/C Concreto con aire incluido
175	0,67	0,54
210	0,58	0,46
245	0,51	0,40
280	0,44	0,35
315	0,38	-----

Tabla No. 6. 6. Valores recomendados de A/C para diferentes resistencias a la compresión en concretos sin aire incluido y concretos con aire incluido.[6.9.4]

Las ecuaciones para estos valores del DECRETO 1400 son:

- Sin aire incluido

$RC_{28D} = (685{,}14) / (7{,}64)^{A/C}$ *en kg/cm²* 6.9.4 (6.34)

- Con aire incluido

$RC_{28D} = (661{,}04) / (11{,}86)^{A/C}$ *en kg/cm²* 6.9.4 (6.35)

En la figura No. 6.4 se representan gráficamente las anteriores correlaciones y los valores recomendados para concreto sin aire incluido por el DECRETO 1400.[6.9.4]

$10kg/cm^2 \approx 1Mpa$

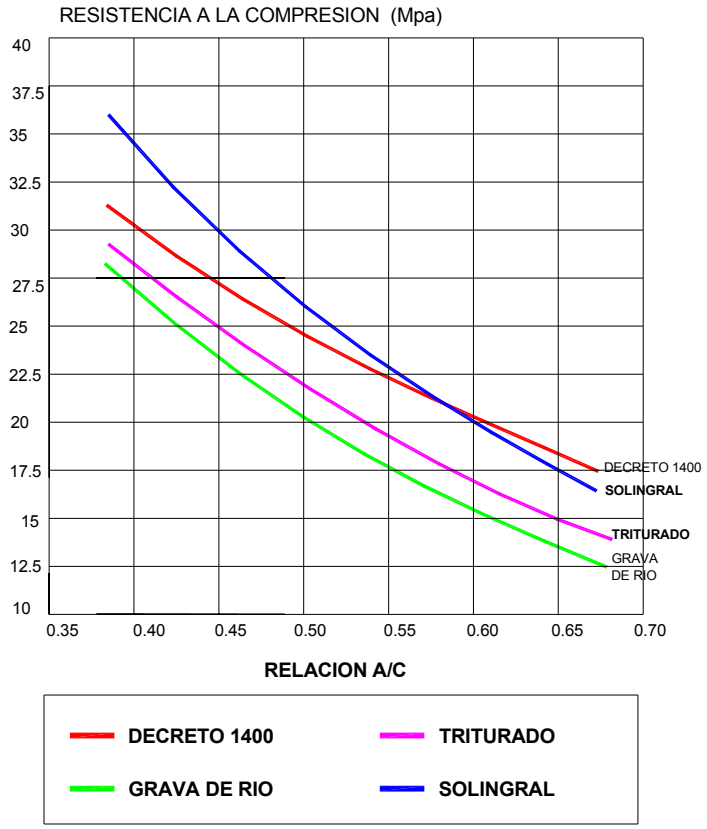


Figura No. 6. 4. Resistencia a la compresión en función de la relación agua / cemento.

6.8.5 TIEMPO, TEMPERATURA Y HUMEDAD

Una vez que el agua ha entrado en contacto con el cemento, el concreto empieza a endurecer gradualmente hasta que pasa del estado plástico al rígido, entonces se dice que el concreto ha "fraguado". Una elevación en la temperatura de curado acelera las reacciones químicas de hidratación, incrementando la resistencia temprana del concreto, sin efectos contrarios en la resistencia posterior; sin embargo, una temperatura más alta durante la colocación y el fraguado, aunque incrementa la resistencia a muy temprana edad, puede afectar adversamente la resistencia a partir de aproximadamente los 7 días. Esto es debido, a que una rápida hidratación inicial parece formar productos de una estructura física más pobre, probablemente más porosa.

La exposición al aire del concreto, debido a la pérdida de humedad, impide la hidratación completa del cemento y por lo tanto la resistencia final disminuirá. La velocidad e intensidad del secamiento depende de la masa de concreto relativa al área de la superficie expuesta, así como también de la humedad ambiente. En la figura No. 6.5 se representa en forma gráfica el efecto de las condiciones de humedad durante el curado y de la humedad del concreto en el instante de falla.

A mayor tiempo de curado, en mayor o menor grado, mayor será la resistencia alcanzada por el concreto. Si el concreto es moldeado y mantenido a una temperatura constante, mientras más alta sea ésta, las resistencias serán mayores hasta edades cercanas a los 28 días; a edades superiores las resistencias no varían apreciablemente pero a mayor temperatura la resistencia será menor. Para una edad de 28 días, tomando como base una temperatura de 23 ^{o}C, a una temperatura de 10 ^{o}C la resistencia es un 18% menor y a 35 ^{o}C un 10% mayor. Lo anterior es válido hasta una temperatura máxima cercana a 50 ^{o}C , pues de ahí en adelante los resultados se invierten.

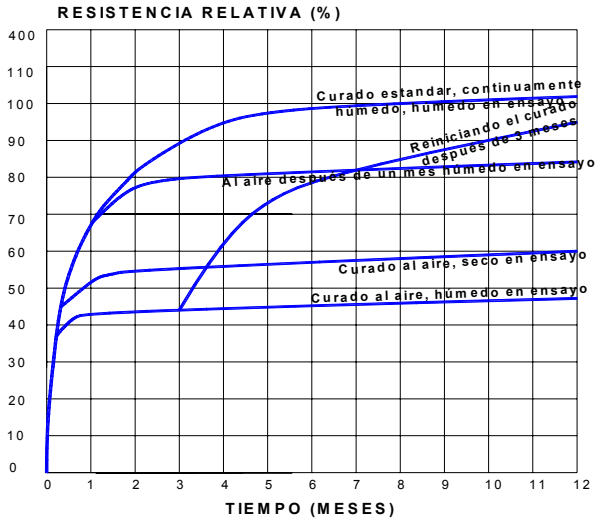


Figura No. 6. 5. Efecto de las condiciones de humedad durante el curado y en el instante de falla sobre la resistencia a la compresión del concreto.[6.9.13]

Por otra parte, si la temperatura de curado es más alta que la temperatura inicial de moldeo, la resistencia resultante a los 28 días será mayor y viceversa; para unos 5 ^{o}C de diferencia entre las temperaturas de moldeo y de curado, la variación de resistencia es del orden de 8%. El aumento promedio de resistencia con el tiempo está indicado en la tabla No. 6.7, en forma aproximada y únicamente para cemento Pórtland tipo 1.

TEMPERATURA ^{o}C	TIEMPO (DÍAS)				
	3	7	14	21	28
10	25	40	63	76	82
23	34	52	76	91	**100 %**
35	40	60	87	102	110

Tabla No. 6. 7 Aumento promedio en porcentaje de la resistencia a la compresión con el tiempo y para diferentes temperaturas.[6.9.1]

Debido a que la resistencia del concreto depende de la edad y de la temperatura, se puede decir que la resistencia está en función de ∑(tiempo * temperatura) y esta suma se llama "MADUREZ"; la regla de la madurez se aplica convenientemente cuando la temperatura inicial del concreto está entre 16 y 27 ^{o}C y no hay pérdida de humedad por secado durante el período considerado, el rango de temperatura de curado se recomienda considerarlo por encima de 0 ^{o}C hasta 50 ^{o}C. La madurez se mide en "^{o}C-Horas" o "^{o}C-Días".

Los españoles toman la madurez como:[6.9.1]

*MADUREZ = # de días * (10 + temperatura)* (6.36)

Cilindros de concreto, hechos de la misma mezcla, que tengan igual madurez tendrán aproximadamente la misma resistencia y entre mayor sea la madurez mayor será la resistencia. Así por ejemplo, la madurez de los cilindros curados en condiciones normalizadas será de 924 días-^{o}C (28 días a 23 ^{o}C); si estos cilindros se curan durante 21 días a 34 ^{o}C desarrollarán aproximadamente la misma resistencia que en condiciones estándar, de acuerdo a la ecuación planteada por los españoles.

Se ha tratado de relacionar la resistencia a la compresión a los 28 días con la resistencia a la compresión a los 7 días, con el fin de poder tomar decisiones más rápidamente sobre la calidad del concreto. Estas relaciones son aproximadas ya que están influenciadas por: las características del cemento, agregados, relación agua / cemento, aditivos, la humedad, la temperatura, etc. Las siguientes ecuaciones pueden servir de guía para estimar la resistencia a la compresión probable a los 28 días.

$RC_{28D} = 50 + 1{,}13\ RC_{7D}$ *en kg/cm^2 (ICPC)* (6.37)

Para materiales del área de Popayán (agua potable, cemento del Valle y agregados de la zona) se han encontrado las siguientes correlaciones:

- Arena y grava de río:

$RC_{28D} = 53,5 + 1,10\ RC_{7D}$ *en* kg/cm^2 ; $r = 0,94$ (6.38)

- Arena y triturado:

$RC_{28D} = 76,9 + 1,06\ RC_{7D}$ *en* kg/cm^2 ; $r = 0,85$ (6.39)

6.8.5.1. Ensayo acelerado para la predicción de resistencias futuras.

Teniendo en cuenta que la construcción se ha desarrollado enormemente y esperar 28 días para definir la calidad de un concreto es mucho tiempo, aún 7 días ya es muy demorado; se ha tratado de correlacionar la resistencia a un día (acelerada mediante el incremento de la temperatura) con la resistencia a los 28 días y de esta forma poder tomar decisiones más rápidamente.

El ensayo se realiza de acuerdo con la norma NTC 1513, consiste en elaborar los cilindros estándar en forma normalizada (descrita en el ensayo de resistencia a la compresión), luego se les coloca una tapa atornillada con tuercas o mariposas. Se deben elaborar mínimo 3 cilindros por cada lote de hormigón.

Una vez tapados los cilindros se dejan en reposo durante 18 horas $\pm$ 30 minutos por el "método A", o 23 horas $\pm$ 30 minutos por el "método B". El procedimiento que se sigue después de haberse completado el tiempo de reposo es el mismo para cualquiera de los dos métodos. Completado el tiempo de reposo se sumergen los cilindros tapados, en el tanque para tratamiento térmico, el cual debe contener agua a una temperatura de 5 ^oC menos que el punto de ebullición; las muestras deben quedar cubiertas con agua a la temperatura indicada, durante un período de 4 horas $\pm$ 5 minutos, al cabo del cual se retiran del tanque, se dejan enfriar durante 1 hora; luego se les saca de los moldes, se refrentan y se ensayan a compresión después de haber transcurrido 2 horas a partir de la terminación del tratamiento térmico.

La resistencia a la compresión a las 24 horas por el método "A", o a las 29 horas por el método "B" debe darse como el promedio de los cilindros ensayados.

En el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, se ha encontrado que para materiales del área de Popayán la resistencia a la compresión a los 28 días es aproximadamente 3 veces la resistencia a la compresión a las 29 horas. Sin embargo, se recomienda encontrar las correlaciones respectivas para cada caso, empleando siempre un mismo método y se sugiere utilizar la siguiente fórmula:

$RC_{28D} = X(RC_{29H}) + Y(RC_{29H})^2$ (6.40)

Donde:

RC_{28D}= Resistencia a la compresión estimada del concreto, a los 28 días, en *kg/cm*^{2}.

RC_{29H}= Resistencia a la compresión determinada por el ensayo rápido, en *kg/cm*^{2} (puede ser 24 horas - método "A").

X, Y = Coeficientes. Para su determinación deben emplearse un mínimo de 10 ensayos, los cuales deben cubrir un rango de por lo menos 140 kg/cm^2 (siempre por el mismo método).

6.8.5.2. Curado del concreto.

El curado se define como el proceso de mantener un contenido de humedad satisfactorio y una temperatura favorable en el concreto, durante la hidratación de los materiales cementantes, de manera que se desarrollen en el hormigón las propiedades deseadas.

El curado es una de las operaciones más importantes en las construcciones con hormigón y lamentablemente una de las más descuidadas. Un buen curado aumenta la resistencia y durabilidad y en general todas las propiedades del concreto endurecido. El endurecimiento del concreto se produce por las reacciones químicas que tienen lugar entre el cemento y el agua. Este proceso, llamado hidratación, continúa solamente si no falta agua y si la temperatura es adecuada. Cuando en el concreto recién colocado se pierde mucha agua por evaporación, la hidratación se interrumpe. Cerca a la temperatura de congelación (0^{o}C) la hidratación prácticamente se detiene. En estas condiciones el concreto deja de ganar resistencia y mejorar otras propiedades convenientes.

Hay tres sistemas muy usados para curar el concreto. Los dos primeros proporcionan la humedad requerida, con el fin de que el concreto desarrolle completamente su resistencia potencial y durabilidad. El tercero aumenta la temperatura por lo tanto se incrementa el desarrollo de resistencia:

A-) Manteniendo un medio húmedo mediante la aplicación de agua.

B-) Evitando la pérdida del agua de mezclado mediante el uso de materiales sellantes.

C-) Acelerar las reacciones.

La evaporación del agua de mezcla puede ser controlada mediante protección y curado adecuados; los efectos secantes de la absorción pueden ser reducidos mediante el uso de agregados húmedos, de formaletas no absorbentes y mojando el suelo. Una señal de que la pasta está perdiendo agua es la aparición de fisuras por retracción plástica en la superficie del concreto cuando está listo para el acabado.

Los métodos y materiales de curado más empleados están contenidos dentro de los tres sistemas de curado mencionados.

Métodos y materiales de curado.

Los métodos más utilizados, de acuerdo a los tres sistemas de curado mencionados son:

A-) Manteniendo un medio húmedo mediante la aplicación continua o frecuente de agua.

Los procedimientos por este sistema pueden ser: la inmersión del elemento de concreto en agua; el uso de rociadores de agua; usando materiales que se mantengan saturados de agua como: aserrín, fique y algodón húmedos colocados sobre la estructura; empleando arena, tierra de contenido orgánico nulo y paja o heno húmedos sobre el concreto.

B-) Evitando la pérdida de agua, usando materiales sellantes.

Son láminas o membranas colocadas sobre el concreto para evitar la pérdida de humedad; o parafinando el elemento de hormigón. Algunos de estos materiales son poco costosos y fáciles de manejar; entre ellos está la película plástica, que puede ser blanca o negra, usada en estados de clima muy soleado y muy frío respectivamente, la blanca permite la reflexión de rayos solares y la negra la absorción de calor. Otro material es el papel impermeable que funciona similar a la película plástica. Los compuestos líquidos que forman membrana como las ceras, resinas y disolventes de alta volatilidad se pueden usar inmediatamente el agua libre ha desaparecido de la superficie.

C-) Acelerar las reacciones.

Consiste en aumentar la temperatura siempre y cuando se mantenga la humedad del concreto para que el cemento se hidrate más rápidamente. Se pueden utilizar mecheros o emplear paneles de energía solar para aumentar la temperatura ambiente. Con alguna frecuencia y en especial en clima frío, se usan quemadores de kerosene o gasolina con ventiladores para calentar recintos, estos calentadores deben contar siempre con buena ventilación.

Criterios para finalizar el curado.

La NSR/98 menciona los siguientes requisitos:

- El concreto, diferente del de alta resistencia temprana, debe mantenerse a una temperatura por encima de los 10 ºC y húmedo para permitir su hidratación, por lo menos durante los primeros 7 días contados a partir de su vaciado.

- El concreto de alta resistencia a edad temprana debe mantenerse a una temperatura por encima a 10 ^{o}C y húmedo para permitir su hidratación, por lo menos durante 3 días después de su vaciado.

Los procedimientos de protección y curado del concreto deben mejorarse cuando las resistencias de los cilindros curados en el campo (bajo las mismas condiciones que la estructura), a la edad especificada para medir F'c, sea menor del 85% de la resistencia obtenida en cilindros curados en el laboratorio. Cuando la resistencia en los cilindros curados en el laboratorio sea apreciablemente mayor que F'c, la resistencia en los cilindros curados en el campo no necesita exceder a F'c en más de 3,5 MPa, aún cuando no se cumpla con el criterio del 85%.

Sin embargo, cabe recordar que entre más tiempo se realice un curado adecuado, mejorarán todas las propiedades del concreto endurecido.

6.8.6 ADITIVOS

Son productos químicos que modifican el desarrollo de la resistencia. Pueden ser acelerantes cuando permiten un rápido desarrollo de la resistencia, siendo el más común el cloruro de calcio el cual debe añadirse en forma de solución como parte del agua de mezcla; o retardantes si hacen que el tiempo de fraguado sea mayor. El uso de retardantes, en general, acompaña alguna reducción en la resistencia en los primeros días (de 1 a 3) mientras que los efectos de estos materiales en las demás propiedades del concreto, como la retracción, pueden no ser previsibles. Por lo tanto, las pruebas de aceptación deberán hacerse con materiales de la obra para las condiciones previstas.

6.9 REFERENCIAS

6.9.1 ANEFHOP (Agrupación Nacional Española de Fabricantes de Hormigón Preparado). Manual de consejos prácticos sobre hormigón. Madrid (España).

6.9.2 ARANGO, T. Jesús H. Artículo: Sensibilidad de la seguridad estructural al control de calidad de los materiales. Memorias: "I Reunión del concreto". Cali (Colombia). 1986

6.9.3 BAUD, G. Tecnología de la construcción. Barcelona (España): Editorial Blume. Tercera edición. 1970.

6.9.4 Código colombiano de construcciones sismo-resistentes. Decreto 1400 de 1984. Capítulos C.4 y C.5. Bogotá (Colombia). 1984.

6.9.5 FERNANDEZ R., CUJAR G., FERNANDEZ G., RIVERA G. Análisis de agregados del área de Popayán usados en la fabricación de mezclas de concreto. Popayán (Colombia): Universidad del Cauca. 1987.

6.9.6 GOMEZ, C. Gabriel. Artículo: Resistencia real de diseño de una mezcla de hormigón. Memorias: "I Reunión del concreto". Cali (Colombia). 1986

6.9.7 ICONTEC. Normas técnicas colombianas para el sector de la construcción - I. Bogotá (Colombia): Legis editores s. a. 1989

6.9.8 ICPC. Práctica recomendada para el curado del concreto. Nota técnica No. 5. Medellín (Colombia). 1976.

6.9.9 ICPC., MADRID C. Registro eficiente de los resultados de ensayo del concreto. Nota técnica No. 8. Medellín (Colombia).

6.9.10 ICPC., MADRID C. Consideraciones sobre el diseño de mezclas y el control de calidad de concreto de cemento para pavimentos. Nota técnica No. 10. Medellín (Colombia).

6.9.11 ICPC., MADRID C., SANTANDER N. Normas ASTM para ensayos de control de calidad del concreto para pavimentos. Nota técnica No. 1. Medellín (Colombia).

6.9.12 ICPC, SANTANDER R. Norman, MADRID M. Carlos, FERNANDEZ O. Otoniel. Pavimentos de concreto - Manual de diseño. Medellín (Colombia): Ediciones gráficas. 1975.

6.9.13 ICPC, SOLINGRAL. Manual de dosificación de mezclas de concreto. Medellín (Colombia). 1974.

6.9.14 MADRID, Carlos A. Resistencia que debe tener el concreto. Medellín (Colombia), comité de la industria del cemento. Andi. 1972.

6.9.15 MENA F., Víctor Manuel y LOERA P., Santiago. Guía para fabricación y control de concreto en obras pequeñas. México: UNAM. 1972.

6.9.16 NEVILLE, A. M. Tecnología del concreto tomo I y II. México: Instituto mexicano del cemento y del concreto. Primera edición, tercera reimpresión. 1980.

6.9.17 NORMAS COLOMBIANAS DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN SISMO RESISTENTE. NSR/98. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá (Colombia) 1998.

6.9.18 PAYA PEINADO, Miguel. Hormigón vibrado y hormigones especiales. España: Ediciones CEAC. 12o Edición. 1979.

6.9.19 PEREZ R. Jaime E. Estadística para ingenieros. Popayán (Colombia): Universidad del Cauca. 1977.

6.9.20 PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (P.C.A.). Proyecto y control de mezclas de concreto. México: Limusa. Primera edición. 1978.

6.9.21 RUIZ DE M. Julia y RIVERA L. Gerardo. Comportamiento de mezclas de concreto elaboradas con agregados del área de Popayán. Popayán (Colombia): Universidad del Cauca. 1984.

6.9.22 SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. Tecnología del concreto y del mortero. Bogotá (Colombia): Pontificia Universidad Javeriana. 1987.

6.9.23 SARMIENTO L. Javier, TORRES P. José, MENDEZ G. Luis A. Artículo: Innovaciones y limitaciones del ultrasonido. Memorias: "I Reunión del concreto". Cali (Colombia). 1986.