

Una Mirada Probabilística al Concreto de Alta Resistencia

Para citar este artículo /
To reference this article /
Para citar este artigo.
Cerón, S. Zaira A., & Ruge,
C. Juan C., & Rodríguez, P.
Álvaro E (2014). Una Mirada
Probabilística al Concreto
de Alta Resistencia. Ingenio
Magno. Vol 5, pp. 18-27

A PROBABILISTIC ANALYSIS OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Z. Cerón.
Universidad Católica de Colombia,
Bogotá, D.C., Colombia.
e_mail: zairaceron@gmail.com.

J.C. Ruge, PhD.
Universidad Católica de Colombia, Bogotá,
D.C., Colombia.
e_mail: jcruge@ucatolica.edu.co.

A. Rodríguez Z, M.Sc
Universidad Católica de Colombia, Bogotá,
D.C., Colombia.
e_mail: aerodriguez@ucatolica.edu.co.

Recepción: 2014 - 5 - 27 \ Aceptación: 2014 - 12 - 20

RESUMEN

Este artículo presenta el análisis probabilístico realizado a dos diseños de mezcla para concreto de alta resistencia como primer paso para obtener un modelo estadístico que logre expresar los resultados de una forma más útil y permita determinar la resistencia y la calidad potencial del concreto. El análisis de resultados del ensayo de resistencia a compresión del concreto se llevó a cabo mediante el uso de un software estadístico llamado SPSS, que a partir de las diferentes variables estadísticas permitió indagar si la distribución de frecuencias, correspondía a la distribución normal que sigue el concreto convencional. Los resultados obtenidos muestran la distribución o la tendencia de resistencia de cada uno de los diseños. El análisis cuantitativo evidencia que la variación de resistencia del concreto refleja con rigor la importancia que tiene conocer las propiedades de la mezcla de concreto y el proceso en los métodos de ensayo.

Palabras clave: Análisis probabilístico, Concreto y Resistencia.

ABSTRACT

This paper presents a probabilistic analysis of two mix designs of High Performance Concrete as a first step in obtaining a statistical model that achieves expressing its results in a more useful way, allowing to determine the potential strength and quality of concrete. The analysis of results of concrete compressive strength test was conducted by using statistical software called SPSS, which by means of different statistical variables, permitted to explore as to whether the frequency distribution corresponded that normally seen in conventional concrete. The results show the distribution or tendency of resistance of each of the designs, and the variation in specific resistance; they also rigorously reflect the importance of knowing both the properties of the concrete mix as well as the procedure for the methods of trial.

Keywords: Concrete and Strength, Probabilistic analysis.

INTRODUCCIÓN

El concreto de alta resistencia o conocido mundialmente como **High Performance Concrete** (HPC), es considerado como objeto relevante de investigación para los académicos desde la mirada de disciplinas de materiales de construcción. Los trabajos sobre el HPC buscan recoger y teorizar al máximo elementos y características propias de este material que tendrá en los próximos años un alto impacto en el gremio de la construcción en nuestro país.

No obstante, los estudios sobre el HPC son escasos y se ha estudiado especialmente en países europeos y de occidente, lo cual plantea un problema si se requiere conocer el modelo probabilístico de este material, que es la mejor herramienta para determinar la resistencia, la calidad potencial del concreto y predecir resultados deseados de resistencia. Por esto la búsqueda y el análisis de este material desde una perspectiva probabilística se hace relevante.

Este documento es el resultado de una investigación académica, con el propósito de explorar y reconocer el modelo del HPC, de forma que amplie el conocimiento sobre las propiedades de este y aporte un nuevo conocimiento en el área de materiales de construcción.

La investigación partió del interrogante ¿Cuál es el modelo probabilístico que caracteriza al concreto de alta resistencia? Para responder esta pregunta se partió de una investigación descriptiva que permitió capturar los datos más relevantes del HPC. Durante su desarrollo se tuvieron limitaciones como la falta de documentación completa sobre el modelo probabilístico del HPC y el corto tiempo para fallar los núcleos que permitieran tener una base propia de resistencia de resultados de resistencia a la compresión.

El objetivo general de esta investigación fue determinar el modelo probabilístico que caracteriza al HPC, teniendo como objetivos específicos: Establecer las características del HPC y la distribución normal del concreto convencional, para observar si presentaba alguna relación

con este; diferenciar los distintos ensayos que se pueden realizar en el HPC y los parámetros que se establecen para cada uno de estos; analizar los resultados del ensayo de resistencia a la compresión, lo que permitió establecer una serie de datos para correlacionar y desarrollar la metodología probabilística comparándolo con el modelo probabilístico del concreto convencional.

Los principales planteamientos de este documento se suman a los distintos estudios que se han realizado en Colombia y en el mundo sobre el HPC, que ven este material bajo el concepto de durabilidad, debido a que entre mayor sea su capacidad de resistencia ante ataques exógenos del medio, mayor será el tiempo de servicio del mismo; lo que ahorrará una cantidad considerable al país en la inversión de mantenimiento y rehabilitación de obras de infraestructura.

MARCO TEÓRICO

El desarrollo del HPC, ha sido progresivo con las etapas de evolución del concreto. El aumento en la resistencia del concreto en los últimos años, lo ha posicionado como el material de construcción más utilizado.

En la década de los 50, los concretos con una resistencia a compresión de 350 kg/cm² a los 28 días eran considerados como de alta resistencia. En la década de los 60 se empleó comercialmente, en Estados Unidos y Japón, concretos con resistencias de 500 kg/cm² a los 28 días. En la década de los 70 ya se utilizaban en forma comercial concretos del orden de 600 kg/cm² como resistencia a la compresión a los 28 días. Para el año 2000 ya se utilizaba para concretos vaciados en sitio concretos con resistencias en compresión a los 54 días del orden de 1400 kg/cm² (Rivva, 2002).

En el mundo han sido muchas las construcciones con este material enfocándose principalmente en Estados Unidos, Europa Occidental y el Sureste Asiático, siendo los EUA el que comenzó con las primeras construcciones con HPC. La experiencia en Colombia, es reducida en cuanto a construcciones

con este material, sin embargo, en el campo de la investigación, se ha comenzado a realizar proyectos sobre este tópico desde la década de los 80's (López, 2011).

Este resultado ha sido posible gracias al desarrollo notable de tecnología de los materiales, principalmente adiciones y aditivos, además, de las investigaciones orientadas a satisfacer la demanda de concretos con resistencias cada vez mayores.

CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

Con el desarrollo de nuevos aditivos químicos para el concreto, se generó la posibilidad de trabajar con nuevos materiales como el concreto de alta resistencia, material que se ha venido usando desde la década de los setenta en lugares como Estados Unidos, Europa y Asia y que logró su gran impulso con la aparición de los plastificantes, súper-fluidificantes e híper-plastificantes. Estos aditivos permitieron la reducción en la relación Agua – Cementante (A/C_m) de las mezclas, pudiéndose así generar concretos con altas manejabilidades y al mismo tiempo relaciones A/C_m muy bajas, lo que redundó en concretos con resistencias a la compresión bastantes altas en comparación con los concretos convencionales ($f_c \leq 41 \text{ MPa}$) de uso típico en el sector de la construcción (Camposano, 2009).

Existen varias ventajas del uso del HPC, resumidas en la Tabla 1.

TABLA 1. Ventajas del uso del HPC

Ventajas del uso del HPC
• Mejora la protección contra la corrosión del acero de refuerzo
• Presenta una mayor resistencia a la erosión
• Proporciona un incremento del área rentable (consecuencia de la reducción de secciones)
• Estructura de menor costo en comparación con las de acero
• Su alta consistencia permite bombearlo a grandes alturas
• Posee alta fluidez que hace posible su colocación aún en zonas congestionadas de acero de refuerzo
• Posible reducción de la cuantía de acero de refuerzo en columnas
• Posible reducción de la proporción del acero de refuerzo según el proyecto
• Menor flujo plástico (Creep)
• Alto módulo de elasticidad
• Usado en losas, permite una remoción temprana de la cimbra de contacto y permite incrementar el espaciamiento del re-apuntalamiento
• Menores pérdidas de pre-esfuerzo
• Incrementa la capacidad max. a flexión en traveses de sección sólida

Teniendo en cuenta los materiales disponibles en Colombia y que la resistencia a compresión comercialmente disponible es como máximo de 28 MPa, el Ing. Guillermo López plantea la siguiente clasificación:

(a) a los concretos con resistencia a compresión menor o igual a 42 MPa se les llamará concretos convencionales, (b) a los concretos que estén entre 42 MPa y 100 MPa se les llamará concretos de alta resistencia y (c) a los concretos de más de 100 MPa se les denominará concretos de ultra alta resistencia. Esta clasificación, excluye los concretos producidos con materiales o técnicas de concreto no convencionales (concretos impregnados con polímeros, concretos epóxicos o concretos con agregados artificiales normales o pesados), según López (2011).

Esto de acuerdo al Comité del Instituto Americano del Concreto ACI 363 (1993), en donde se establece que la clasificación de alta resistencia está directamente asociada a la base geográfica:

En regiones en donde los concretos con resistencia a compresión de 62 MPa estén siendo producidos comercialmente, se les puede llamar HPC a los hormigones que estén en el rango entre 83 y 103 MPa; sin embargo, en regiones en donde el límite superior del material comercialmente disponible es 34 MPa, se puede considerar concreto de alta resistencia al hormigón que esté en 62 MPa (ACI, 1993).

Los materiales usados para generar este concreto son iguales a los utilizados en el concreto convencional, sin embargo se debe tener mayor previsión en la selección de materiales a utilizar en el HPC pues la uniformidad de la mezcla de concreto, como resultado en el proceso en obra de este, hace alusión no sólo a la apariencia sino al logro de las propiedades deseadas, estas deben reflejar el alto desempeño y resistencia del concreto en sus condiciones de uso y su durabilidad durante su vida útil.

CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO

Las diferencias en la resistencia pueden ser originadas por dos causas fundamentales: Las diferencias en la resistencia producidas por las propiedades del concreto y de sus componentes, incluyendo el proceso de producción y dosificación y las diferencias aparentes en la resistencia producidas por las variaciones inherentes al ensayo (ICONTEC, 2013). De acuerdo a la NTC 2275, las principales causas de variaciones de la resistencia se enuncian en la Tabla 2.

TABLA 2. Causas de la variación de resistencia en el concreto

Variaciones de las propiedades del concreto	Variaciones debidas a los métodos de ensayo
<ul style="list-style-type: none"> Cambios en la relación A/Cm ocasionados por: Deficiente control de agua Variación excesiva de humedad en el agregado Retemplado 	<ul style="list-style-type: none"> Procedimientos de muestreo incorrectos
<ul style="list-style-type: none"> Variación en la cantidad de agua requerida, ocasionada por cambios en: Granulometría, absorción y forma de las partículas del agregado Propiedades de los cementantes y aditivos Contenido de aire Tiempo de entrega y temp. 	<ul style="list-style-type: none"> Variaciones debidas a la técnica de elaboración de las muestras: Manejo, almacenamiento y curado de cilindros Moldes de calidad eficiente
<ul style="list-style-type: none"> Variaciones en las características y proporciones de los componentes: Agua Agregado Cemento Adiciones Aditivos 	<ul style="list-style-type: none"> Cambios en el curado: Variación en la temperatura Humedad variable Retraso en el traslado de los cilindros al lab. Demora en el inicio del curado
<ul style="list-style-type: none"> Variación en el mezclado, transporte, colocación y compactación 	<ul style="list-style-type: none"> Procedimientos de ensayo deficientes: Procedimientos de ensayo
<ul style="list-style-type: none"> Variación en la temperatura del concreto y en el curado 	<ul style="list-style-type: none"> Preparación de los especímenes Equipos descalibrados

Teniendo en cuenta lo anterior, la mejor manera de obtener un criterio de calidad de acuerdo a una dispersión de datos es el método estadístico.

Para obtener el máximo de información, debe efectuarse una cantidad suficiente de ensayos con el objeto de conocer la variación en el concreto elaborado y permitir la utilización de los procedimientos estadísticos apropiados que serán empleados en la interpretación de los resultados de los ensayos. Los procedimientos estadísticos proporcionan la mejor herramienta para que de tales resultados se determine la resistencia y la calidad potencial del concreto y se expresen los resultados de la manera más útil (ICONTEC, 2013).

Para tener un punto de partida en la determinación del modelo probabilístico del Concreto de Alta Resistencia, se hizo un breve análisis al modelo probabilístico del concreto convencional que se da mediante la distribución gaussiana o normal.

MODELO PROBABILÍSTICO DEL CONCRETO CONVENCIONAL

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 con los ensayos normalizados y suponiendo que haya sido curado en forma correcta, se emplea generalmente como índice de calidad del mismo (Rivera, 2010).

Contando con un cierto número de ensayos para una muestra de concreto convencional, y ubicándolos en un diagrama sobre la correspondiente resistencia a la compresión en la coordenada "x", es posible determinar que una cantidad de ensayos establecidos en la coordenada "y", tienen resistencias menores que el valor promedio, mientras que otros adquieren valores mayores que el valor promedio, tal como se observa en la Figura 1.

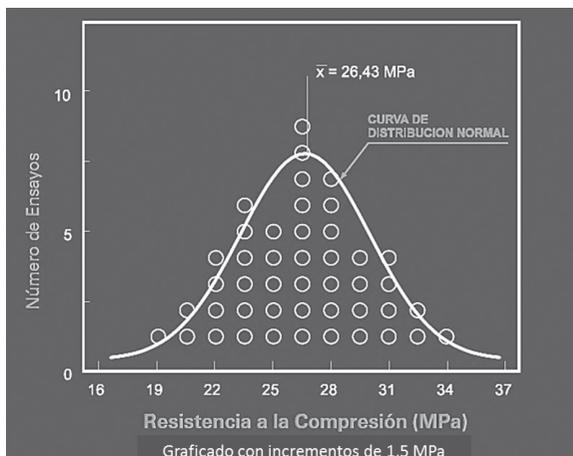


FIGURA 1. Curva de distribución normal de frecuencias en el concreto convencional (Rivera, 2010).

Para obtener información más precisa, es necesario realizar una cantidad suficiente de ensayos (para que el análisis estadístico sea confiable debe ser de mínimo 30) con el objetivo de identificar la desviación estándar en el concreto y poder utilizar los procedimientos estadísticos adecuados que se emplearán en la interpretación de los resultados de los ensayos.

Típicamente, las pruebas de concreto para resistencia se tratan como si se ajustaran a un patrón de distribución de frecuencias similar al de la curva de distribución normal. Cook (1989) reporta que los datos de concreto de alta resistencia, donde el factor limitante es la resistencia del agregado, suelen producir distribuciones sesgadas. Si la distribución es en forma de pico o aplanada existe curtosis. Los datos que exhiben sesgos o curtosis significativos no están distribuidos de manera normal y cualquier análisis suponiendo una distribución normal puede llevar a conclusiones erróneas que ser informativos (ICONTEC, 2013). Vale la pena recalcar que la curtosis es entendida como el grado de concentración que presentan los valores analizados alrededor de la zona central de la distribución.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para ser legible y poder llevar a cabo un análisis del comportamiento del HPC, se requirió una unidad de análisis que captura la complejidad

de los parámetros de calidad que se describen a partir de la normatividad colombiana en el principal método de ensayo para la obtención del modelo probabilístico: Resistencia a compresión del concreto.

MUESTRA

Con el fin de determinar el modelo probabilístico del HPC, se utilizaron resultados de ensayos de resistencia a compresión obtenidos a 24 horas, 3 días, 7 días, 14 días, y 28 días, para una resistencia esperada $wf'c$ de 60 MPa, de dos diseños: 10035792 y 10035794. La resistencia a la compresión del HPC se midió de igual manera que en el concreto convencional, utilizando la norma NCT 673 (ASTM C39). Este ensayo se realizó en cilindros de concreto de 7.5 cm. x 15 cm. 10 cm. x 20 cm. y 15 cm. x 30 cm. los cuales cumplían una relación diámetro-altura de 1:2.

INSTRUMENTOS

Los resultados de las pruebas de resistencia a compresión se emplean esencialmente para estimar que la mezcla de concreto cumpla con los requerimientos de resistencia ($f'c$) solicitados en la estructura. Sin embargo, los resultados de este ensayo se pueden utilizar con diversos propósitos como control de calidad, aceptación del concreto, o para evaluar la eficacia de curado y protección de la estructura. Por esta razón se hace imprescindible la aplicación de métodos cuantitativos que permitan detectar estos aspectos.

Al realizar el cálculo de probabilidades surge un concepto conocido como factor de probabilidad p , lo que significa que, dependiendo el tipo de obra, se puede admitir un porcentaje de ensayos con resistencia menor a $f'c$. En la Tabla 3, se observan los factores de probabilidad y porcentajes de ensayos con resistencias menores a la de diseño.

TABLA 3. Factores de probabilidad y % ensayos menores a $f'c$

Factor	%	Factor	%	Factor	%
0,00	50,00	1,10	13,60	2,20	1,40
0,10	46,00	1,20	11,50	2,30	1,10
0,20	42,10	1,30	9,70	2,33	1,00
0,30	38,20	1,40	8,10	2,40	0,80
0,40	34,50	1,50	6,70	2,50	0,60
0,50	30,90	1,60	5,50	2,60	0,45
0,60	27,40	1,70	4,50	2,70	0,35
0,70	24,20	1,80	3,60	2,80	0,25
0,80	21,20	1,90	2,90	2,90	0,19
0,90	18,20	2,00	2,30	3,00	0,13
1,00	15,90	2,10	1,80	Se permite interpolar los valores	

En la mayoría de los casos este valor corresponde al 1%, es decir que para que sólo uno de cada 100 ensayos tenga un valor menor que $f'c$, el factor de probabilidad debe ser de 2,33.

Hay que considerar que el resultado de una prueba es el promedio de mínimo 3 pruebas de resistencia de una misma muestra de concreto, curadas de manera convencional y ensayada en la misma edad, además para que su resultado se considere satisfactorio debe cumplir los siguientes requisitos:

(a) Cada promedio aritmético de tres ensayos de resistencia consecutivos (media móvil) debe ser igual o superior a $f'c$, (b) Ningún resultado individual del ensayo de resistencia puede ser menor que $f'c$ por más de 3,5 MPa, cuando $f'c$ es igual o menor que 35 MPa; o por más de $0.10f'c$ cuando $f'c$ es mayor que 35 MPa (Camposano, 2009).

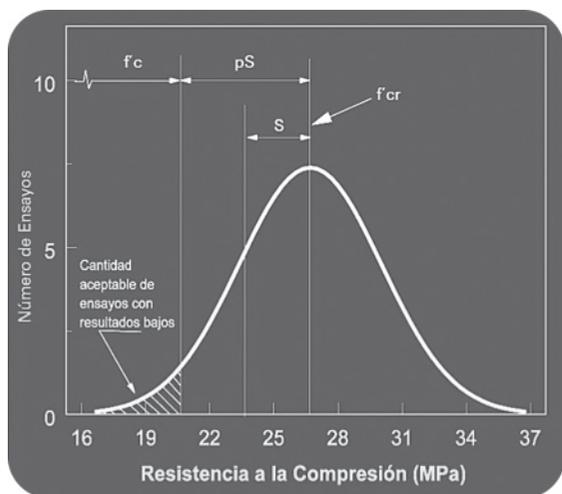


FIGURA 2. Desv. estándar y factor en el cálculo de probabilidad de la resist. al concreto (Rivera, 2010).

Para cumplir con los requisitos de resultado de una prueba se debe diseñar en laboratorio una mezcla de concreto para una resistencia requerida $f'c$, que debe ser mayor a $f'cr$.

En la Figura 2, se muestra como para obtener la resistencia $f'c$ con la cantidad aceptable de ensayos con resultados bajos, se requiere incrementar un valor $p.S$, para obtener $f'cr$. Si la desviación estándar se ha calculado con mínimo treinta ensayos de resistencia. La Tabla 4, presenta las ecuaciones establecidas por el ACI 318, considerando que solo el 1% arroje resultados menores a $f'c$ con $p=2.33$.

TABLA 4. Ecuaciones para $f'cr$ según ACI 318

$f'c$ (MPa)	Ecuación
General	$f'cr = f'c + pS$
$f'c < 21$	$f'cr = f'c + 1.34S$
$21 < f'c < 35$	$f'cr = f'c + 2.33S - 3.5$
$f'c > 35$	$f'cr = 0.90 f'c + 2.33S$

Si de lo contrario, la desviación estándar se ha calculados con menos de treinta ensayos de resistencia, se debe utilizar un factor de corrección en la desviación estándar de la muestra, en la Tabla 5 se anotan los valores establecidos por el ACI 318.

TABLA 5. Factor de corrección para S según el número de ensayos

No. Ensayos	Factor de corr. de la desv. estándar de la muestra	
<15	Resist. requerida cuando no hay ensayos suficientes (MPa)	
	$f'c < 21$	$f'cr = f'c + 7.0$
	$21 < f'c < 35$	$f'cr = f'c + 8.3$
	$f'c > 35$	$f'cr = 1.1f'c + 5.0$
15	1,16	
20	1,08	
25	1,03	
>30	1,00	

La NSR-10 también establece valores de resistencia requerida cuando los ensayos no son suficientes, la Tabla 6 resume lo determinado en el capítulo C.5.2 de la NSR-10.

TABLA 6. Ecuaciones para $f'cr$ de acuerdo a la NSR-10 para menos de 15 ensayos

$f'c$ (MPa)	Ecuación
$f'c < 21$	$f'cr = f'c + 7,0$
$21 < f'c < 35$	$f'cr = f'c + 8,5$
$f'c > 35$	$f'cr = f'c + 10$

De acuerdo con esto, se tuvo en cuenta que el menor valor de $f'cr$, estuviese de acuerdo a la norma ACI 318 y la NSR-10.

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN

Con el propósito de explorar de la manera más precisa se examinaron los resultados del ensayo de resistencia a compresión mediante un software estadístico SPSS *Statistical Data Analysis*, con miras a identificar la estructura fundamental con la que se organizan los datos en la distribución de frecuencia. El SPSS correlaciona los datos siguiendo las especificaciones de la correlación estadística para mostrar una interfaz gráfica.

RESULTADOS

Una vez sistematizada la información, se procedió a obtener los parámetros de calificación estadística de cada diseño, para identificar a primera vista si la distribución de los datos tenía una tendencia probabilística normal; los parámetros son curtosis y asimetría entre el rango de -0,5 a 0,5, esto se evidencia en la Figura 3. Así mismo se observó la distribución de frecuencias para saber la ubicación bajo la curva normal, indicada en la Tabla 7.

TABLA 7. Resultados estadísticos de los dos diseños

Diseño 10035792		Diseño 10035794	
N	Validos - 77	N	Validos - 144
	Perdidos - 0		Perdidos - 0
Media	68,968	Media	58,177
Mediana	70,577	Mediana	61,995
Desv. tip.	16,7958	Desv. tip.	25,4189
Asimetría	-0,289	Asimetría	-0,534
Error tip. de asim.	0,274	Error tip. de asim.	0,202
Curtosis	-0,118	Curtosis	-0,731
Error tip. de curtosis	0,541	Error tip. de curtosis	0,401
Rango	75,0	Rango	94,4
Mínimo	22,9	Mínimo	7,1
Máximo	97,9	Máximo	101,5
Percentiles	25 - 57,968	Percentiles	25 - 44,952
	50 - 70,577		50 - 61,995
	75 - 80,875		75 - 77,067

Sin embargo, para poder afirmar que cumple este parámetro se verificó mediante un método de evaluación de modelos estadísticos (gráfico P-P), el cual agrupa los datos cerca de una recta si se aproximaba a esta distribución. El primer diseño cumplió con la verificación para una distribución normal. El segundo diseño por lo contrario, no cumplió ninguno de los parámetros, es por ello

que se optó por hacer una verificación con otras distribuciones.

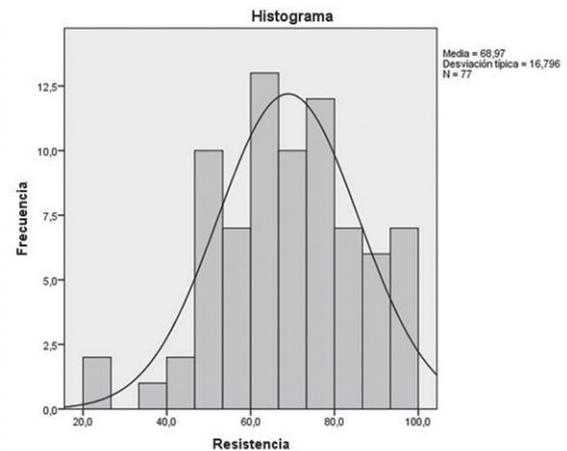


FIGURA 3. Distrib. de frecuencias para el diseño 10035792

Al ser la resistencia una variable continua, se analizó la distribución binomial, log-normal y *weibull*. Sin embargo la primera no cumplió por la distribución de frecuencias del diseño, las otras se analizaron mediante el gráfico P-P, los resultados se observan en la Figura 4.

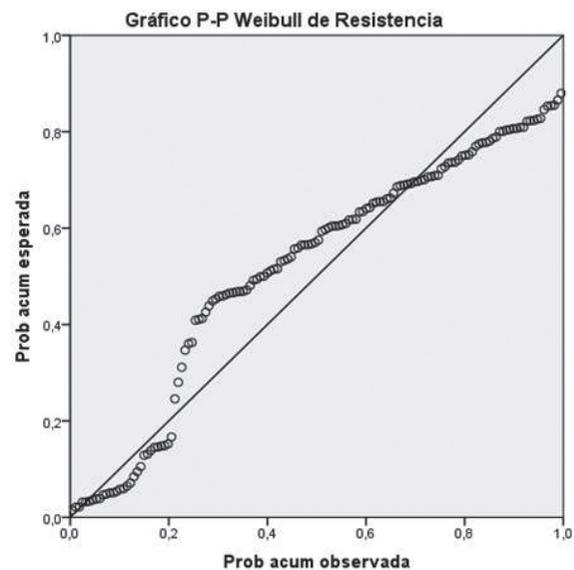


FIGURA 4. Gráfico P-P distrib. weibull para diseño 10035794

Tras estos resultados se procedió a hacer un gráfico de dispersión de los datos, con el fin de obtener la tendencia que cumple este diseño, en la Figura 5, se observa que el factor de correlación que predomina en este diseño es el logarítmico con un R2 de 0.9435.

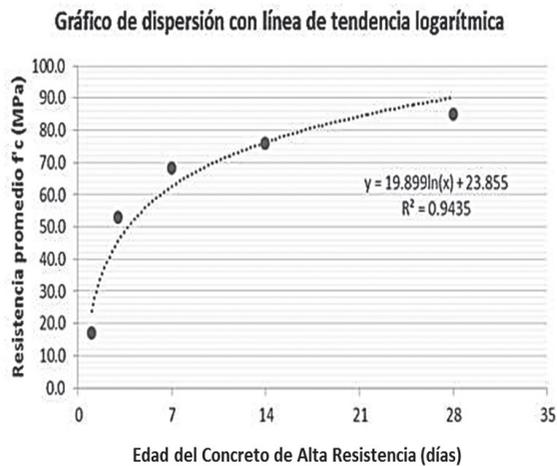


FIGURA 5. Gráfico de dispersión para hallar la tendencia del diseño 10035794

Después del análisis estadístico, se comprobó para los dos diseños que se cumpliera los requisitos establecidos por el ACI 318. El primer criterio establece que cada promedio aritmético de tres ensayos de resistencia consecutivos (media móvil) debe ser igual o superior a $f'c$, esto se observa en la Figura 6. (Diseño 10035794).

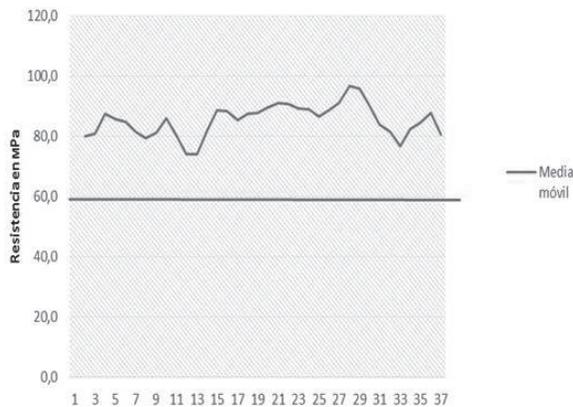


FIGURA 6. Primer requisito establecido por ACI 318

El segundo criterio dictamina que ningún resultado individual del ensayo de resistencia puede ser menor que $f'c$ por más de 3,5 MPa cuando $f'c$ es igual o menor que 35 MPa; o por más de 0,10 $f'c$ cuando $f'c$ es mayor que 35 MPa. Los resultados obtenidos para el diseño se muestran en la Figura 7 (Diseño 10035794).

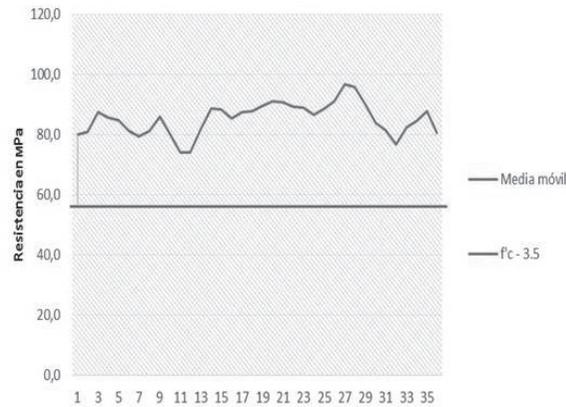


FIGURA 7. Segundo requisito fijado por ACI 318

Después de evaluar cada parámetro se afirmó que los dos diseños cumplen con los requisitos establecidos por la ACI 318.

CONCLUSIONES

- Este tipo de concreto evidencia la importancia de la generación de nuevos proyectos de construcción y la necesidad de validar científicamente, prácticas empleadas en el ejercicio de la construcción.
- El costo del HPC es mayor al de un concreto convencional, debido a la presencia de aditivos y la baja relación A/Cm; pero el beneficio en la disminución de tiempo en alcanzar resistencias altas, de grandes secciones estructurales y aumento de durabilidad, lo hace una opción por considerar.
- La metodología probabilística para el análisis del HPC proporciona resultados que contienen una información completa y real sobre el nivel de resistencia de la mezcla.
- El modelo probabilístico del HPC varía de acuerdo con varios factores, entre ellos está: la resistencia exigida, que para el caso de los diseños evaluados fue de 60 MPa; la estacionalidad de la zona en la cual se requiere el material, y las especificaciones requeridas para el proyecto. Esto se evidenció al tener dos diseños de HPC con distinta distribución probabilística.

- Es posible obtener un concreto con mayor resistencia del esperado, lo cual se demuestra con la Figura 3, en donde se evidencia que el pico de la curva está separada de los 60 MPa.
- La razón por la cual el segundo diseño tiene una distribución muy alejada a la primera puede derivarse de variaciones debidas a los métodos de ensayo o propiedades del concreto indicadas anteriormente.
- Los parámetros de sesgo y curtosis permiten fácilmente aprobar o descartar un modelo estadístico.

AGRADECIMIENTOS

A la empresa Holcim, por el suministro de la información y asesoría en la investigación.

Al semillero de Geomateriales, adscrito al grupo de investigación en Pavimentos y Materiales de Ingeniería de la Universidad Católica de Colombia.

REFERENCIAS

American Concrete Institute (1993). Reported by ACI Committee 363. 374 p. Miami: The Institute, USA.

Camposano, J. (2009) Control de Calidad en el Hormigón, Notas técnicas. Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Concreto. 15 p. Quito, Ecuador

Cook, J. (1989). 10,000 psi Concrete. Concrete International. 11(10) 67-75. EUA.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas (2013). Normas técnicas colombianas para la construcción. NTC 2275 ICONTEC. 17 p. Bogotá, Colombia.

Lopez, L. (2011) Influencia del porcentaje de adición de la micro sílice y del tipo de curado, en la penetración del ion cloruro en el concreto de alto desempeño. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Trabajo de Grado. 140 p. Bogotá, Colombia.

Rivera, G. (2010). Concreto Simple. Universidad del Cauca, 2010. 267 p. Cali, Colombia.

Rivva, E. (2002) Concreto de Alta Resistencia. Instituto de la Construcción y Gerencia. 150 p. Lima, Perú.