

# ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

ZAIRA ANDREA CERÓN SUÁREZ



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
TRABAJO DE GRADO  
BOGOTÁ  
2013

# **ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DEL CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA**

**ZAIRA ANDREA CERÓN SUÁREZ**

**Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Civil**

**Director**  
**Álvaro Enrique Rodríguez Páez**  
**Ingeniero**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**TRABAJO DE GRADO**  
**BOGOTÁ**  
**2013**



## Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

**Atribución-NoComercial-CompartirIgual 2.5 Colombia (CC BY-NC-SA 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



**Compartir bajo la Misma Licencia** — Si altera o transforma esta obra, o genera una obra derivada, sólo puede distribuir la obra generada bajo una licencia idéntica a ésta.

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Ing. Álvaro Enrique Rodríguez  
Director de Proyecto

---

Presidente del Jurídico

---

Jurídico

---

Jurídico

Bogotá, 23 de octubre, 2013

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por la salud y los hechos que permitieron el presente trabajo de grado. A mi abuelita por sus oraciones y bendiciones. A mi madre, por la oportunidad de recibir una educación privilegiada y por sus valiosos consejos durante cada día de mi vida. A mi hermana, por siempre darme su afecto y apoyo. A mi novio, agradezco su paciencia en todo este proceso.

Al Ingeniero Álvaro Rodríguez por el apoyo incondicional en la realización, discusión y crítica de este trabajo. Al Ing. Juan Carlos Ruge por todo su apoyo en este proceso como director del semillero de investigación de Geomateriales. Al Ing. Sair Bittar e Ing. Harry Sosa por los aportes realizados durante la evolución del presente trabajo. Al profesor Giovanni Martínez por la valiosa asesoría brindada.

**ZAIRA ANDREA CERÓN SUÁREZ**

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	10
1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO	12
1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	12
1.2 CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA	14
1.2.1 Materiales requeridos para la mezcla y características	15
1.2.2 Propiedades del Concreto de Alta Resistencia	16
1.2.3 Usos del Concreto de Alta Resistencia	18
1.2.4 Ventajas del Concreto de Alta Resistencia	18
1.3 MARCO NORMATIVO COLOMBIANO	18
1.3.1 Normas para control de calidad y características del concreto	18
1.4 CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO	22
1.4.1 Variaciones en la resistencia	22
1.5 MODELO PROBABILÍSTICO DEL CONCRETO CONVENCIONAL	24
2 PROGRAMA EXPERIMENTAL	28
2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA	28
2.1.1 Agua	28
2.1.2 Agregados	28
2.1.3 Cemento	29
2.1.4 Aditivos	30
2.2 MÉTODOS DE ENSAYO	30
2.2.1 Método de ensayo para determinar la calidad del agua para la elaboración del concreto	30
2.2.2 Método volumétrico para determinar el contenido de aire	32
2.2.3 Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto	34
2.2.4 Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado	36
2.2.5 Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión	38
2.2.6 Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión	40
3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
3.1 RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN PARA DISEÑOS DE HPC	46
3.2 METODOLOGÍA PROBABILÍSTICA	48

3.3	RESULTADOS PROBABILÍSTICOS ARROJADOS POR SPSS	50
3.3.1	Diseño 10035792	50
3.3.2	Diseño 10035794	52
3.4	REQUISITOS DE ACEPTABILIDAD DEL CONCRETO - ACI 318	56
3.4.1	Gráficas de los requisitos para el diseño 10035792	56
3.4.2	Gráficas de los requisitos para el diseño 10035794	57
	CONCLUSIONES	59
	RECOMENDACIONES	61
	BIBLIOGRAFÍA	62

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Principales Normas Técnicas Colombianas del concreto.	19
Tabla 2. Principales Causas de variaciones de resistencia en el concreto	23
Tabla 3. Valores de desviación estándar y grado de uniformidad del concreto	26
Tabla 5. Propiedades físicas del agregado usado en la mezcla del HPC	28
Tabla 6. Propiedades físicas del cemento usado en la mezcla del HPC	29
Tabla 7. Propiedades físico-químicas permitidas en la elaboración del concreto	31
Tabla 8. Cantidad de aire para mezcla de concreto	33
Tabla 9. Parámetros de consistencia del concreto según su uso	35
Tabla 10. Diagrama de fallas en especímenes cilíndricos a compresión	41
Tabla 11. Factores de probabilidad y % ensayos menores a $f_c$	42
Tabla 12. Ecuaciones para $f'_{cr}$ de acuerdo al ACI 318	44
Tabla 13. Factor de corrección para S según el número de ensayos	44
Tabla 14. Ecuaciones para $f'_{cr}$ de acuerdo a la NSR-10 cuando se tienen menos de 15 ensayos	45
Tabla 15. Resultados estadísticos Diseño 10035792	50
Tabla 16. Resultados estadísticos Diseño 10035794	52

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Lake Point Tower	13
Figura 2. Taipei 101	13
Figura 3. Bacatá Downtown	14
Figura 4. Curva de distribución gaussiana o normal de frecuencias	25
Figura 5. La desviación estándar dada por los puntos de inflexión de la curva normal	25
Figura 6. Valores de S o V que indican calidad de la mezcla	26
Figura 7. Curva granulométrica de los agregados	29
Figura 8. Procedimiento para la determinación de aire por el método volumétrico.	33
Figura 9. Procedimiento para la determinación del asentamiento – Cono de Abrams	34
Figura 10. Procedimiento para la determinación del tiempo de fraguado.	37
Figura 11. Procedimiento para la determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson	38
Figura 12. Curva Típica Esfuerzo-Deformación	39
Figura 13. Procedimiento para la determinación de la resistencia a la compresión.	41
Figura 14. Desviación estándar y factor de probabilidad en el cálculo de probabilidad de la resistencia al concreto.	43
Figura 15. Evaluación de resistencias a compresión - Diseño 10035792.	46
Figura 16. Evaluación de resistencias a compresión - Diseño 10035794.	47
Figura 17. SPSS (Paso 1)	48
Figura 18. SPSS (Paso 2)	49
Figura 19. SPSS (Paso 3)	49
Figura 20. SPSS (Paso 4)	50
Figura 21. Histograma de frecuencias Diseño 10035792	51
Figura 22. Gráfico P-P Normal Diseño 10035792	52
Figura 23. Histograma de frecuencias Diseño 10035794	53
Figura 24. Gráfico P-P Normal Diseño 10035794	53
Figura 25. Gráfico P-P LogNormal Diseño 10035794	54
Figura 26. Gráfico P-P Weibull Diseño 10035794	54
Figura 27. Gráfico de dispersión con línea de tendencia logarítmica	55
Figura 28. Gráfico de dispersión con línea de tendencia polinómica	56
Figura 29. Primer criterio de aceptación Diseño 10035792	57
Figura 30. Segundo criterio de aceptación Diseño 10035792	57
Figura 31. Primer criterio de aceptación Diseño 10035794	58
Figura 32. Segundo criterio de aceptación Diseño 10035794	58

## INTRODUCCIÓN

El Concreto de Alta Resistencia ahora 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 Concreto de Alta Resistencia 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 llevada a cabo durante un semestre académico, con el propósito de explorar y reconocer el modelo del HPC, que amplió el conocimiento sobre las propiedades de éste y aporte un nuevo conocimiento en el área de materiales de construcción.

El objetivo general de esta disertación fue determinar el modelo probabilístico que caracteriza al Concreto de Alta Resistencia; con los objetivos específicos de, establecer las características del Concreto de Alta Resistencia, y la distribución gaussiana del concreto simple para observar si presenta alguna relación con éste; 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, que permitan establecer una serie de datos para correlacionar y así desarrollar una metodología probabilística y a su vez observar si los resultados obtenidos presentan algún tipo de similitud con el modelo probabilístico del concreto convencional.

Teniendo en cuenta lo antepuesto, se escogió como metodología para esta investigación el tipo descriptivo, ésta se identifica por

Analizar e inventariar características de fenómenos, objetos, problemas de estudio para definir su naturaleza, se propone conocer un grupo de fenómenos utilizando criterios sistemáticos que permitan poner de manifiesto su estructura lógica o comportamiento. No se ocupan de la verificación de hipótesis, sino de la descripción de hechos a partir de un modelo teórico definido previamente.<sup>1</sup>

De esta manera el trabajo que se presenta a continuación recoge los antecedentes del Concreto de Alta Resistencia, sus características y propiedades,

---

<sup>1</sup> ESCORCIA, Olavo. Manual para la investigación. Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia, 2006. 41 p.

el control de calidad determinado no solo para resistencia a compresión sino también para diferentes ensayos, teniendo en cuenta a su vez el modelo del concreto convencional para dar base a la determinación del modelo probabilístico del HPC.

El primer capítulo de esta investigación, se enfocó al estado del conocimiento donde se enmarcaran los antecedentes, definiendo qué es el Concreto de Alta resistencia y algunas de sus características; los controles por resistencia que se aplican al concreto, estableciendo los ensayos que se deben realizar para obtener ésta y características de cada uno de estos; y las características de aceptabilidad del concreto, dando inicio al tema de la distribución gaussiana del concreto convencional como punto de partida. El segundo, aborda todas las especificaciones de materiales y definición de ensayos con sus respectivos parámetros para poder determinar con valides su aceptabilidad. El tercero, permitirá exponer los resultados obtenidos, haciendo un análisis de los mismos y presentando todos los datos y gráficas obtenidas. Finalmente, se realizaron las respectivas conclusiones de la investigación en base a toda la información suministrada en la investigación.

Esta 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 permitiera capturar los datos más relevantes del HPC. Durante su desarrollo se tuvieron limitaciones como la falta de documentación completa sobre el modelo probabilístico del Concreto de Alta Resistencia y el corto tiempo para fallar los núcleos en el laboratorio personalmente en el tiempo necesario que permitieran tener una base propia de resistencia del Concreto de Alta Resistencia. Parecía entonces haber llegado el momento de renunciar, por este motivo, la autora desea agradecer la colaboración de Holcim Colombia S.A. quién suministró los materiales, la mezcla, los datos de ensayos presentados en el documento y ejecutó los ensayos en su laboratorio de concreto.

Los principales planteamientos de esta investigación se suman a los distintos estudios que se han realizado en Colombia y en el mundo sobre el Concreto de Alta Resistencia, 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. Esto ahorra una cantidad considerable al país en la inversión de mantenimiento y rehabilitación de obras de infraestructura.

# 1 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

Antes de comenzar la rigurosa metodología probabilística para determinar el modelo del concreto de Alta Resistencia, es preciso describir los antecedentes que se tienen sobre este tipo de concreto y revisar las características propias de este material con el fin de contextualizar el punto central de la investigación; igualmente es necesario conocer la normativa colombiana sobre los tipos de ensayos que se realizan en el concreto para obtener su resistencia teniendo en cuenta sus parámetros de calidad. Es por ello que el presente capítulo tiene la doble finalidad de demostrar por qué es importante analizar probabilísticamente este material y cuál es la normativa de los ensayos que se requieren para su determinación.

## 1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El desarrollo del Concreto de Alta Resistencia o Concreto de Alto Desempeño, conocido mundialmente como High Performance Concrete (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/cm<sup>2</sup> 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/cm<sup>2</sup> a los 28 días. En la década de los 70 ya se utilizaban en forma comercial concretos del orden de 600 kg/cm<sup>2</sup> 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/cm<sup>2</sup>.<sup>2</sup>

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 80s.<sup>3</sup> Entre las distintas construcciones a nivel mundial, se encuentra:

- El edificio Lake Point Tower (1968) en Chicago, Illinois, cuyas columnas tienen una resistencia de 51 MPa y cuenta 70 pisos.

---

<sup>2</sup> RIVVA LÓPEZ, Enrique. Concreto de Alta Resistencia. Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia, 2002. 150 p.

<sup>3</sup> LÓPEZ YÉPES, Lucio Guillermo. 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. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Modalidad Trabajo de Grado, 2011. 140 p.

**Figura 1. Lake Point Tower**



Fuente. GUÍA DE CHICAGO. La Torre Lake Point cumplió 40 años [en línea]. Bogotá [citado 15 de octubre, 2009] Disponible en Internet: <URL: <http://www.hispago.com/archive/la-torre-lake-point-cumplio-40-anos>>

- El Taipei 101 Tower (2004) en Taipéi, Taiwán, cuyas columnas tienen una resistencia de 69 MPa y cuenta con 101 pisos.

**Figura 2. Taipei 101**



Fuente. SKYSCRAPER CENTER. Taipei 101 [en línea]. Bogotá [citado enero, 2013] Disponible en Internet: <URL: <http://www.skyscrapercenter.com/taipei/taipei-101/>>

- El Bacatá Downtown, de 66 pisos será un rascacielos compuesto por dos torres, una de ellas la más alta de Colombia, sus columnas tendrán una resistencia de 84 MPa, este es el complejo arquitectónico más ambicioso que se construye actualmente en la capital del país, se estima la finalización de la construcción en 2015.

**Figura 3. Bacatá Downtown**



Fuente. EL PAIS. Proyecto BD Bacatá la torre más alta de la capital [en línea]. Bogotá [citado 12 de abril, 2010] Disponible en Internet: <URL: <http://lacomunidad.elpais.com/sin-pelos-en-la-lengua/2010/4/12/proyecto-bd-bacata-torre-mas-alta-la-capital>>

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. La construcción de importantes edificaciones no hubiera sido posible sin el HPC.

## **1.2 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 alto desempeño (HPC), material que se ha venido usando desde la década de los setentas en lugares como Estados Unidos, Europa y Asia y que logró su gran impulso con la aparición de los plastificantes, superfluidificantes e hiperplastificantes. Estos aditivos permitieron la reducción en la relación Agua – Cementante (A/Cm) de las mezclas, pudiéndose así generar concretos con altas manejabilidades y al mismo tiempo relaciones A/Cte muy bajas, lo que redundó en concretos con resistencias a la compresión bastantes altas en comparación con los concretos convencionales ( $f'c \leq 41$  MPa) de uso típico en el sector de la construcción.<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Ibíd. P. 26

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 más de 100 MPa se le 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).<sup>5</sup>

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 concretos de alta resistencia 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 este en 62 MPa.<sup>6</sup>

### 1.2.1 Materiales requeridos para la mezcla y características

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. Entre las características requeridas de los materiales que componen el concreto para que posea una alta resistencia a la compresión, se tiene:

**Cemento.** Son recomendables los tipos I y II, con contenidos significativos de silicato tricálcico (mayores que los normales), módulo de finura alto y composición química uniforme.

**Grava.** De alta resistencia mecánica, estructura geológica sana, bajo nivel de absorción, buena adherencia, de tamaño pequeño y densidad elevada.

**Arena.** Bien gradada, con poco contenido de material fino plástico y módulo de finura controlado (cercano a 3.00).

**Agua.** Requiere estar dentro de las normas establecidas.

**Mezcla.** Relaciones agua/cemento bajas (de 0.25 a 0.35), mezclado previo del cemento y del agua con revolvedora de alta velocidad, empleo de agregados cementantes, período de curado más largo y controlado, compactación del concreto por presión y confinamiento de la mezcla en dos direcciones.

---

<sup>5</sup> Ibíd. P. 26-27

<sup>6</sup> AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Reported by ACI Committee 363. Miami: The Institute, 1993. 374 p.

**Aditivos.** Es recomendable emplear alguno o una combinación de los aditivos químicos: superfluidificantes y retardantes; y, de los aditivos minerales, ceniza volante, microsíllica o escoria de alto horno.

**Cenizas Volantes.** Son un subproducto de los hornos que emplean carbón mineral como combustible para la generación de energía, deben tener conformidad con la norma ASTM C 618.

**Escorias Molidas de Alto Horno.** Son productos no metálicos producidos en un alto horno, producto del hierro, se usa escoria bien molida de alto horno cumpliendo con la norma ASTM C989.

**Humo de Sílice.** Es un material puzolanico de alta reactividad y es un subproducto de la producción de metal silíceo o ferro-silíceo., deben cumplir con la norma ASTM C1240.<sup>7</sup>

Este último es también conocido como microsíllice. Adicional, a los anteriormente descritos, López también describe un material importante para el HPC, los superplastificantes

**Superplastificantes.** Son de uso obligatorio en este tipo de concretos, ya que por su baja relación A/Cte, se hace casi imposible obtener una adecuada manejabilidad y fluidez del concreto si no se le adiciona a la mezcla un superplastificante. Gómez (2001) en su libro, muestra como el uso de superplastificante en el HPC es indispensable pues su adición aumenta las resistencias del hormigón, especialmente a edades tempranas. Esto se debe tanto a la reducción del agua como a una mejor dispersión de las partículas de cemento que se traduce en una mejor hidratación.<sup>8</sup>

## 1.2.2 Propiedades del Concreto de Alta Resistencia

La uniformidad de la mezcla de concreto, como resultado en el proceso en obra de éste, 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.

### 1.2.2.1 Propiedades del concreto fresco

Al respecto conviene mencionar los aspectos principales de las propiedades en concretos de Alta Resistencia con adición de microsíllice y superplastificantes, los cuales son según Rivva López<sup>9</sup>:

- a. Una mezcla con adición de microsíllice se considera con el grado óptimo de cohesividad si no es excesivamente áspera ni excesivamente viscosa, es

---

<sup>7</sup> GÓMEZ MARTÍNEZ, M. Á. (2011). Diseño Estructural de Edificios Altos Tipo Torre Empleando Concreto de Alta Resistencia. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Modalidad Trabajo de Grado, 2011. 187 p.

<sup>8</sup> LÓPEZ YÉPES, Lucio Guillermo. 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. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Modalidad Trabajo de Grado, 2011. 140 p.

<sup>9</sup> RIVVA LÓPEZ, Enrique. Concreto de Alta Resistencia. Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia, 2002. 150 p.

decir es lo suficientemente plástica para permitir fácil manipulación y trabajabilidad en condiciones de obra.

- b. La presencia de microsílices genera una disminución en la viscosidad del material pero otorga un aumento en la resistencia al corte de la mezcla fresca.
- c. La adición de microsílíce a una mezcla diseñada para ser bombeada actúa como ayuda para éste y genera muy buenas características a la mezcla.
- d. Se puede reducir la cantidad del agua en un 28% cuando se emplea superplastificantes a bases de formaldehído melanina sulfonatada.
- e. La adición de superplastificantes incrementa el asentamiento, aunque este es de corta duración y entre media hora a una hora el concreto regresa a su consistencia natural.
- f. La proporción de pérdida de asentamiento obedece a la dosificación, tipo de superplastificante y temperatura a la que se encuentra tanto el concreto como el cemento.
- g. El tiempo de fraguado del concreto no se ve afectado por la adición de superplastificantes de acuerdo al ensayo de penetración.
- h. No se debe generar exudación del concreto ni segregación, si se aplica la dosificación recomendada por el fabricante del superplastificante.
- i. Alguno HPC pueden encontrarse sin compactación mecánica, lo que genera ahorro no sólo en el tiempo sino en la inversión económica.
- j. El contenido de aire contenido en el concreto puede disminuir con el tiempo, es necesario realizar ensayos antes y después del moldeo de los especímenes.

### **1.2.2.2 Propiedades del concreto endurecido**

Cabe señalar en relación con las propiedades del acero endurecido los aspectos principales en concretos de Alta Resistencia con adición de microsílíce y superplastificantes, los mencionados por Rivva López<sup>10</sup> son:

- a. La adición de microsílíce hace que la resistencia en el concreto tanto en tensión como flexión, aumentan proporcionalmente a la resistencia a la compresión.
- b. Entre menor sea la relación agua/cementante mayor será la propiedad mecánica del concreto.
- c. Cuando la relación agua/cementante es baja puede presentarse astillamiento si el concreto se encuentra expuesto a rápidas elevaciones de temperatura.
- d. El uso de baja relación agua/cementante y contenido moderado de cemento permite minimizar la contracción del concreto.
- e. La deformación prorrogada en compresión decrece según el incremento de resistencia en compresión.

---

<sup>10</sup> Ibíd. P. 36

### **1.2.3 Usos del Concreto de Alta Resistencia**

El Concreto de Alta Resistencia (HPC) es ideal para construir:

- Muros de rigidez, columnas y trabes en edificios de oficinas, departamentos, centros comerciales, hoteles y rascacielos
- Trabes de gran claro pre-esforzadas
- Estructuras costeras, sanitarias y militares, etc.
- Bóvedas de seguridad
- Elementos prefabricados

### **1.2.4 Ventajas del Concreto de Alta Resistencia**

Entre las ventajas del uso del Concreto de Alta Resistencia (HPC) esta:

- Mejora la protección contra la corrosión del acero de refuerzo
- La estructura tiene un menor costo en comparación con otras diseñadas en acero
- Presenta una mayor resistencia a la erosión
- Incremento del área rentable (consecuencia de la reducción de secciones)
- 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 del proporcionamiento 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
- Se incrementa la capacidad máxima a flexión en trabes de sección sólida

## **1.3 MARCO NORMATIVO COLOMBIANO**

Es significativa la importancia que tiene conocer las normas que establece nuestro país respecto a la construcción de obras de infraestructura. En la Norma Sismo Resistente (NSR-10), en el capítulo 1.2 Alcance de supervisión técnica se referencia los requisitos de control de los materiales, de acuerdo al tema y ubicación en dicha norma, al remitirse a cada una de ellas se encuentra la respectiva Norma Técnica Colombiana que determina los objetivos, alcances, procedimientos y características de cada uno de ellos.

### **1.3.1 Normas para control de calidad y características del concreto**

A continuación, se muestra una tabla que resume las principales Normas Técnicas Colombianas que se utilizan para evaluar y caracterizar las propiedades y calidad del Concreto.

**Tabla 1. Principales Normas Técnicas Colombianas del concreto.**

<b>Norma Técnica Colombiana</b>	<b>Título</b>	<b>Objetivo</b>
NTC – 673 (2000)	Ensayo de Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto	<p>Este método de ensayo trata sobre la determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto, tales como cilindros moldeados y núcleos perforados. Se encuentra limitado al concreto que tiene un peso unitario mayor que 800 kg/m<sup>3</sup> [50 lb/ft<sup>3</sup>].</p> <p>Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por la sección transversal de área del espécimen.</p>
NTC –396 (1992)	Método de Ensayo para Determinar el Asentamiento del Concreto.	<p>Esta norma establece el método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto en la obra y en el laboratorio.</p> <p>Una muestra de concreto fresco se coloca en un molde tronco cónico y se compacta mediante una varilla. El molde se levanta permitiendo que el concreto se asiente. El asentamiento corresponde a la diferencia entre la posición inicial y la desplazada de la superficie superior del concreto. Las mediciones se deben tomar en el centro de la cara superior. El valor resultante debe incluirse en el informe como el asentamiento del concreto.</p>
NTC - 4325 (1997)	Método de Ensayo para la Determinación de la Velocidad del Pulso Ultrasónico a Través del Concreto	<p>Esta norma cubre las especificaciones para el ensayo no destructivo de especímenes de concreto no reforzado, concreto reforzado, concreto pretensado, elementos prefabricados y estructuras de concreto, mediante la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico. Determinación de la uniformidad del concreto de un elemento o entre elementos. La detección de grietas y la evaluación aproximada de su tamaño, así como de vacíos y otros defectos del concreto.</p>

**Tabla 1. (Continuación)**

<p>NTC – 174 (2000)</p>	<p>Especificaciones de los agregados para concreto</p>	<p>Esta norma establece los requisitos de gradación y calidad para los agregados finos y gruesos, (excepto los agregados livianos y pesados) para uso en concreto, también es para uso en especificaciones de proyectos, para definir la calidad del agregado, su tamaño máximo y otros requisitos de gradación específicos. Las personas responsables de seleccionar las proporciones de la mezcla de concreto también deben determinar las proporciones de agregado fino y grueso y la adición de una mezcla de agregados de diferente tamaño, si se requieren o aprueban.</p>
<p>NTC – 3459 (2001)</p>	<p>Agua para la Elaboración de Concreto</p>	<p>Esta norma tiene por objeto determinar el método para establecer por medio de ensayos, si el agua es apropiada para la elaboración de concreto.</p> <p>El agua debe ser clara y de apariencia limpia, libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, sales, materiales orgánicos y otras sustancias que puedan ser dañinas para el concreto o el refuerzo. Si contiene sustancias que le produzcan color, olor o sabor inusuales, objetables o que causen sospecha, el agua no se debe usar a menos que existan registros de concretos laborados con ésta, o información que indique que no perjudica la calidad del concreto</p>
<p>NTC – 890 (1995)</p>	<p>Determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto por medio de su resistencia a la penetración</p>	<p>Este método de ensayo cubre la determinación del tiempo de fraguado del concreto, con asentamiento mayor a cero, por medio de mediciones de resistencia a la penetración sobre el mortero tamizado de la mezcla de concreto, es apropiado para ser usado solamente cuando los ensayos de la fracción de mortero proporcionen la información requerida, puede ser aplicado para cualquier tipo de mortero, incluso los de relleno y puede ser aplicable bajo condiciones de laboratorio controladas o bajo condiciones de campo. Los valores se registrarán de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades.</p>

**Tabla 1. (Continuación)**

<p>NTC – 4025 (2006)</p>	<p>Método de Ensayo para Determinar el Modulo de Elasticidad Estático y la Relación de Poisson en Concreto a Compresión</p>	<p>Esta norma determina: (1) el módulo de elasticidad secante (o módulo de Young) y (2) la relación de Poisson de cilindros de concreto normalizados y núcleos de concreto, cuando éstos se hallan bajo esfuerzos de compresión longitudinal. Las definiciones de módulo de elasticidad secante y de relación de Poisson, se encuentran en las definiciones de la NTC 4525 (ASTM E6).</p> <p>Esta norma proporciona una relación de esfuerzo a deformación y una relación de deformación lateral a longitudinal para el concreto endurecido a cualquier edad y condiciones de curado establecidas.</p>
<p>NTC – 722 (2000)</p>	<p>Método de Ensayo para Determinar la Resistencia a la Tensión Indirecta de Especímenes Cilíndricos de Concreto</p>	<p>Este método de ensayo permite determinar la resistencia a la tensión indirecta de especímenes cilíndricos de concreto, tales como los cilindros moldeados y núcleos.</p> <p>El método de ensayo presentado aquí consiste en la aplicación de una fuerza de compresión diametral en la longitud de un espécimen de concreto cilíndrico a una velocidad que se encuentra dentro del intervalo prescrito hasta que ocurra la falla. Esta carga induce esfuerzos de tensión en el plano que contiene la carga aplicada y esfuerzos de compresión relativamente altos en el área inmediatamente circundante a la carga aplicada. Ocurre falla por tensión, no por compresión, debido a que las áreas de aplicación de carga se encuentran en estado de compresión triaxial, lo que les permite soportar esfuerzos de compresión mayores que los indicados en el resultado del ensayo de resistencia a la compresión uniaxial.</p>
<p>NTC – 1028 (1994)</p>	<p>Determinación del contenido de Aire en Concreto Fresco Método Volumétrico</p>	<p>Esta norma contempla la determinación del contenido de aire del concreto fresco que contiene cualquier tipo de agregado, ya sea éste denso, celular o liviano.</p>

**Tabla 1. (Continuación)**

NTC – 2275 (1997)	Método para la evaluación de los resultados de los ensayos de resistencia del concreto	El propósito de los ensayos de resistencia del concreto es el de determinar el cumplimiento de una especificación de resistencia y el de medir su variabilidad. Por ello esta norma, determina el control que debe tener el concreto para permitir una reducción en los costos del concreto, puesto que la resistencia promedio se puede acercar más a los requisitos de la especificación.
----------------------	--	---

Fuente. El Autor

La resistencia a la compresión y la de durabilidad son tal vez las propiedades más relevantes en el concreto, teniendo en cuenta estas características innatas del material se puede determinar su calidad para el periodo de servicio.

## **1.4 CONTROL DE CALIDAD DEL CONCRETO**

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 formaleas, la compactación a que se someta y el curado que se le proporcione.<sup>11</sup>

De acuerdo a lo mencionado por Rivera en su libro *Concreto Simple*, es necesario tomar las medidas correspondientes para que se pueda garantizar la calidad del material, sin embargo, hay algo que es relevante y esto es la precisión y exactitud de los ensayos, ya que esto influirá directamente en los resultados.

### **1.4.1 Variaciones en la resistencia**

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.<sup>12</sup>

<sup>11</sup> RIVERA, Gerardo. *Concreto Simple*. Cali: Universidad del Cauca, 2010. 267 p.

<sup>12</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. *Normas técnicas colombianas para la construcción*. NTC 2275 Bogotá: ICONTEC, 2013. 17 p.

De acuerdo a la NTC 2275 las principales causas de variaciones de la resistencia se enuncian en la siguiente tabla:

**Tabla 2. Principales Causas de variaciones de resistencia en el concreto**

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

Fuente. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas técnicas colombianas para la construcción. NTC 2275 Bogotá: ICONTEC, 2013. 17 p.

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.<sup>13</sup>

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

### **1.5 MODELO PROBABILÍSTICO DEL CONCRETO CONVENCIONAL**

Los procedimientos estadísticos proveen la mejor herramienta para determinar la resistencia, la calidad potencial del concreto y para lograr expresar los resultados de la forma más útil.

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 periodo 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.<sup>14</sup>

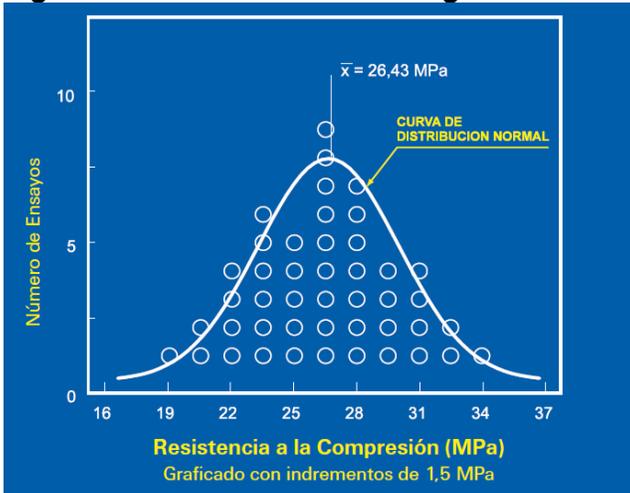
Contando con un cierto número de ensayos para una muestra de concreto convencional, y ubicándolos en un diagrama sobre la correspondiente resistencia a la compresión en la coordenada  $x$ , es posible determinar que una cantidad de ensayos establecidos en la coordenada  $y$ , tienen resistencias menores que el valor promedio, mientras que otros adquieren valores mayores que el valor promedio. La curva que se forma conocida como “La campana de Gauss” corresponde a la conocida distribución gaussiana o normal.

---

<sup>13</sup> *Ibíd.* P. 7

<sup>14</sup> RIVERA, Gerardo. *Concreto Simple*. Cali: Universidad del Cauca, 2010. 267 p.

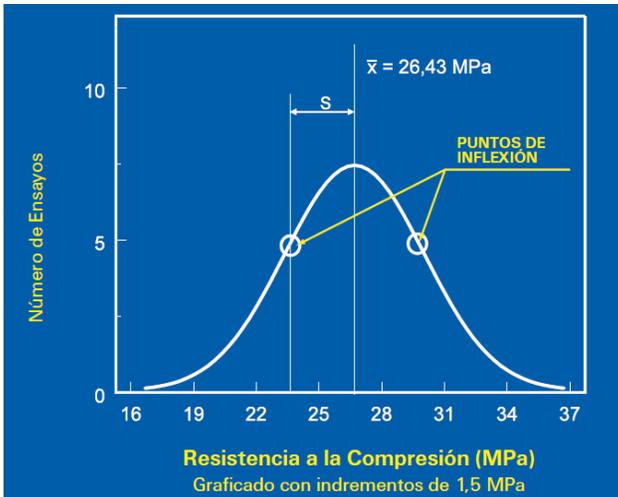
**Figura 4. Curva de distribución gaussiana o normal de frecuencias**



Fuente. CAMPOSANO L, José. Control de Calidad en el Hormigón, Notas técnicas, Instituto ecuatoriano del cemento y del concreto, Quito, Ecuador, 2009

De acuerdo con Camposano, lo que determina el valor de la desviación estándar  $S$  son los puntos de inflexión de la curva de distribución normal, en la siguiente figura se indica lo dicho.

**Figura 5. La desviación estándar dada por los puntos de inflexión de la curva normal**



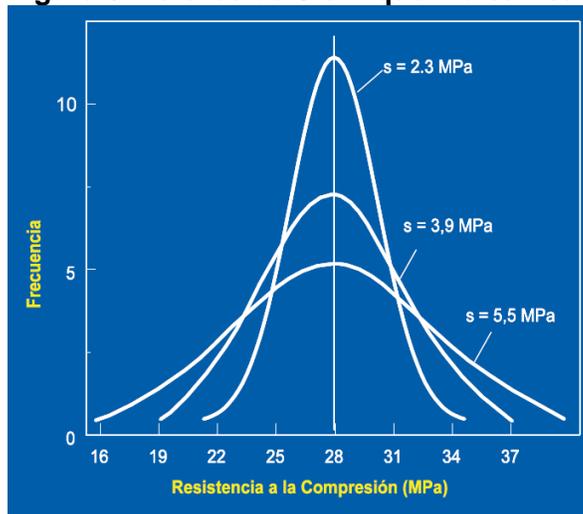
Fuente. CAMPOSANO L, José. Control de Calidad en el Hormigón, Notas técnicas, Instituto ecuatoriano del cemento y del concreto, Quito, Ecuador, 2009

Obedeciendo al Instituto Americano de Concreto en el ACI 214 R, el valor de dicha desviación estándar se obtiene a través de la ecuación  $S = \frac{\sqrt{X_i^2 - n\bar{X}^2}}{n-1}$ ; donde,  $n$  es el número total de ensayos,  $X_i$  es el promedio de resistencia de a cantidad de

cilindros ensayados (mínimo 3), y  $\bar{X}$  es el promedio de los valores de  $X_i$ , es decir de todos los ensayos promediados.

Ahora bien, de acuerdo con Rivera, los valores de  $S$  o  $V$  usados en la ecuación nos revelan que tan dispersos son los datos, valores muy altos representan resultados alejados del promedio, lo que significa baja calidad de la mezcla; por el contrario un valor pequeño representa uniformidad en la mezcla, es decir una buena regularidad en la producción del concreto, en la siguiente figura se observan distintos valores de  $S$ , que a su vez se ven afectados por la cantidad de ensayos realizados.

**Figura 6. Valores de  $S$  o  $V$  que indican calidad de la mezcla**



Fuente. CAMPOSANO L, José. Control de Calidad en el Hormigón, Notas técnicas, Instituto ecuatoriano del cemento y del concreto, Quito, Ecuador, 2009

Dentro de este contexto, Rivera plantea una tabla donde muestra los valores típicos de desviación estándar y grado de uniformidad que puede esperarse en el concreto en distintas condiciones de producción. En la siguiente tabla, se presenta esta hipótesis.

**Tabla 3. Valores de desviación estándar y grado de uniformidad del concreto**

<b>S (%)</b>	<b>Uniformidad</b>	<b>Condiciones en que se obtiene</b>
0 – 5	Excelente	Condiciones de laboratorio.
5 – 10	Muy bueno	Preciso control de materiales y dosificación por masa
10 – 15	Bueno	Buen control de materiales y dosificación por masa
15 – 20	Mediano	Algún control de materiales y dosificación por masa
20 – 25	Malo	Algún control de materiales y dosificación por volumen
>25	Muy malo	Ningún control de materiales y dosificación por volumen

Fuente. El Autor

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.<sup>15</sup>

Dentro de este marco ha de considerarse la necesidad de iniciar un proceso riguroso de ensayos y toma de muestras que permitan establecer el propósito de la investigación mediante un modelo probabilístico.

---

<sup>15</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas técnicas colombianas para la construcción. NTC 2275 Bogotá: ICONTEC, 2013. 17 p.

## 2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para comprender e interpretar los resultados experimentales y poder aproximarnos al modelo probabilístico del Concreto de Alta Resistencia mediante una perspectiva rigurosa, conceptual y técnica, es preciso desarrollar e integrar los conceptos normativos colombianos y establecer los parámetros de calidad que incorpora cada uno de los métodos de ensayos, siendo relevante conocer a su vez las características de la mezcla con la cual trabaja. De este modo, el presente capítulo tiene el propósito de describir las generalidades del proceso experimental que se desarrollaron para lograr el objetivo de esta investigación.

### 2.1 CARACTERÍSTICAS DE LA MEZCLA

Del anterior capítulo es posible derivar, la importancia en la selección de los materiales a utilizar en el HPC. Es por eso que se tuvo en cuenta los materiales disponibles en Colombia y se emplearon materiales usuales en la industria de la construcción de nuestro país.

A continuación, se hace la descripción de los materiales empleados en la mezcla de Concreto de Alto Resistencia usada en esta investigación, para una obtener una resistencia de 60 MPa a la edad de 28 días

#### 2.1.1 Agua

Las propiedades físico-químicas del agua empleada en esta investigación para realizar la mezcla para obtener el Concreto de Alta Resistencia son las mismas del agua usada para el concreto convencional. Estos datos no fueron suministrados por la empresa ya que son de carácter privado.

#### 2.1.2 Agregados

Los agregados obtenidos en el Departamento de Santander, son procedentes de minas localizadas en Floridablanca. El material es de origen geológico sedimentario, esto según estudios realizados por la empresa propietaria de la cantera de donde se extrae el material. Las especificaciones y propiedades físicas de este material se observan en la tabla a continuación.

**Tabla 4. Propiedades físicas del agregado usado en la mezcla del HPC**

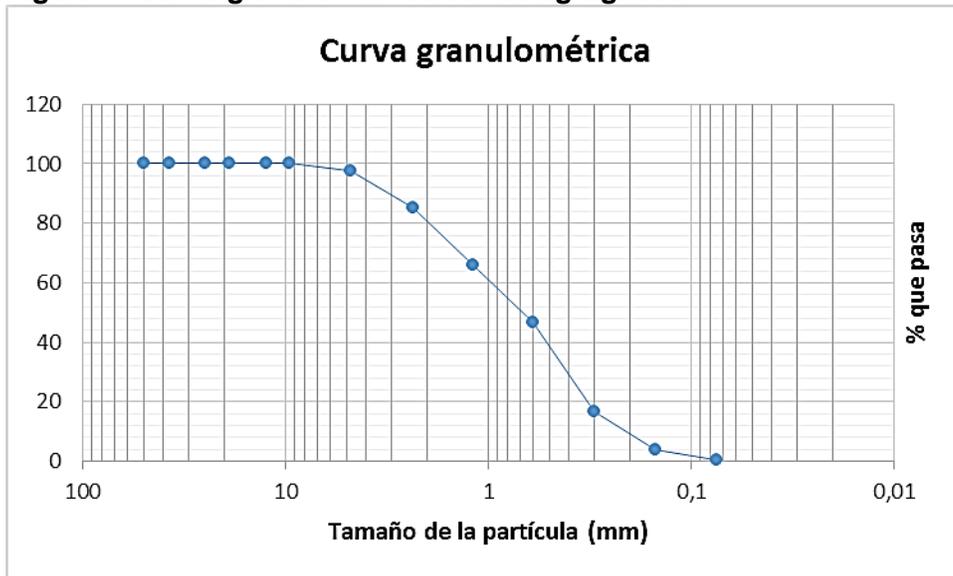
PROPIEDADES FÍSICAS	
Origen (Sed., Met, Ígneo)	Sedimentario
Fuente (Lugar)	Floridablanca
Tipo de agregado	Arena Triturada
Humedad total (%)	6.2

**Tabla 5. (Continuación)**

Módulo de finura	2.84
Pasa tamiz 75µm por lavado (%)	0.15
Pasa tamiz 75µm por tamizado (%)	0.24
Total pasa tamiz 75µm (%)	0.39

Fuente. El Autor

**Figura 7. Curva granulométrica de los agregados**



Fuente. El Autor

### 2.1.3 Cemento

Para esta investigación se seleccionó el Cemento Holcim Boyacá tipo I, con el fin de usar materiales típicos de la construcción en nuestro país, a este cemento se le analizaron sus características físicas enunciadas en la siguiente tabla.

**Tabla 5. Propiedades físicas del cemento usado en la mezcla del HPC**

PROPIEDADES FÍSICAS	
Fraguado inicial (horas – min)	2.5 > 0.75
Fraguado final (horas – min)	5 < 8
Resistencia a compresión 3 d (kg/cm <sup>2</sup> )	120
Resistencia a compresión 7 días (kg/cm <sup>2</sup> )	185
Resistencia a compresión 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	300

Fuente. El Autor

#### **2.1.4 Aditivos**

Los aditivos utilizados no fueron suministrados por la empresa que realizo la mezcla, ya que son de carácter privado.

Finalmente, la ruta de esta investigación nos conduce a una metodología experimental a través de diversos métodos de ensayo, así es posible observar si existe algún patrón de comportamiento relativamente estable, para determinadas características de la mezcla de HPC y por otra parte, si existe cierto comportamiento de acuerdo a elemento espaciales y/o de resistencia deseada.

### **2.2 MÉTODOS DE ENSAYO**

Para ser legible y poder llevar a cabo un análisis del comportamiento del Concreto de Alta Resistencia, se requiere una unidad de análisis que atrape la complejidad de los parámetros de calidad que se describen a partir de la normatividad Colombiana en cada uno de los métodos de ensayos a referir en esta investigación. Obviamente en este proceso se deben seguir reglas y mecanismos básicos como la observación, la interpretación de datos y la experiencia que provee la realización de cada ensayo.

Al margen de lo mencionado, se explicará la importancia, el proceso y los parámetros de cada uno de los ensayos propuestos para esta investigación. Con el fin de que el lector pueda concebir las diferentes metodologías y procedimientos experimentales adoptados para diferenciar el comportamiento del HPC.

#### **2.2.1 Método de ensayo para determinar la calidad del agua para la elaboración del concreto**

Es importante resaltar que la calidad del agua puede influir en la resistencia del concreto perturbando el fraguado y el endurecimiento de éste, es por eso que la norma técnica colombiana NTC 3459 - Agua para elaboración de concretos, estipula:

El agua para elaborar el concreto puede tomarse de fuentes naturales y, por lo tanto puede contener elementos orgánicos indeseables o contenidos inaceptables de sales inorgánicas, Las aguas superficiales, en particular, a menudo contienen materia en suspensión, como aceite, arcilla, sedimentos, hojas y otros desechos vegetales, y puede ser inadecuado emplearlas sin tratamiento físico preliminar, como filtración o sedimentación para que dicha materia en suspensión se elimine. El agua debe ser clara y de apariencia limpia, libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, sales, materiales orgánicos y otras sustancias que puedan ser dañinas para el concreto. Si contiene sustancias que produzcan color, olor o sabor inusual que causen sospecha, el

agua no se debe usar a menos que existan registros de concretos elaborados con ésta, o información que indique que no perjudica la calidad del concreto.<sup>16</sup>

Lo que implica hacer un análisis físico-químico del agua, para verificar sus componentes y garantizar que no genere efectos negativos sobre el concreto, pues como menciona Medina, para obtener un buen concreto:

Es necesario que en su primera edad se encuentre en un entorno que reúna adecuadas condiciones de temperatura y humedad, que aseguren la hidratación del cemento. Las acciones que contribuyen al logro de este ambiente reciben la denominación de “curado”.<sup>17</sup>

En la siguiente tabla se referencian las propiedades físico-químicas del agua permitidas por la norma NTC 3459 para la elaboración de concreto.

**Tabla 6. Propiedades físico-químicas permitidas en la elaboración del concreto**

<b>PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS PERMITIDAS – NTC 3459</b>	
Temperatura (°C)	No Aplica (N.A.)
Sustancias Flotantes	No Aplica (N.A.)
Color (UPC)	No Aplica (N.A.)
Turbiedad (NTU)	No Aplica (N.A.)
pH	≥ 5
Dureza (mg/L)	No Aplica (N.A.)
Sulfatos (mg/L)	1 000
Cloruros (mg/L)	1 000
Sólidos totales (mg/L)	50 000
Sólidos disueltos (mg/L)	2 000

Fuente. El Autor

Los datos de está tabla se toman como parámetros para determinar los resultados de laboratorio en el agua de la mezcla del HPC de esta investigación.

<sup>16</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Concretos - Agua Para La Elaboración De Concreto. NTC 3459. Bogotá: ICONTEC, 2001. 7 p.

<sup>17</sup> MEDINA RESTREPO. Carlos Andrés. Concreto confeccionado con aguas lluvia: Un aporte a la disminución del impacto ambiental generado por la industria de la construcción. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Arquitectura. Modalidad trabajo de grado, 2013. 48 p.

### **2.2.2 Método volumétrico para determinar el contenido de aire**

La inclusión de aire es necesaria en el concreto, es por ello que durante la mezcla es introducido un volumen de aire denominado *aire atrapado*.

Los vacíos microscópicos de aire incluido aportan una fuente de alivio a la presión interna dentro del concreto para acomodar las presiones desarrolladas cuando se forman los cristales de hielo en los poros y en los capilares del concreto. Sin el contenido de aire, se escamará y/o astillará, dando como resultado una falla en la durabilidad del concreto.<sup>18</sup>

Sin embargo, si el volumen de aire se incrementa fuera de los límites, habrá una reducción correspondiente en la resistencia del concreto y por supuesto en su durabilidad. Según Rivera:

La consistencia de una mezcla puede conservarse si el volumen de arena se reduce en la misma cantidad que se aumentó el contenido de aire; si se hace esta reducción, es posible disminuir el contenido de agua en un 3% por cada 1% de aire incorporado y de esta forma recuperar parte de la resistencia mecánica que se pierde por la presencia de vacíos dentro de la mezcla.<sup>19</sup>

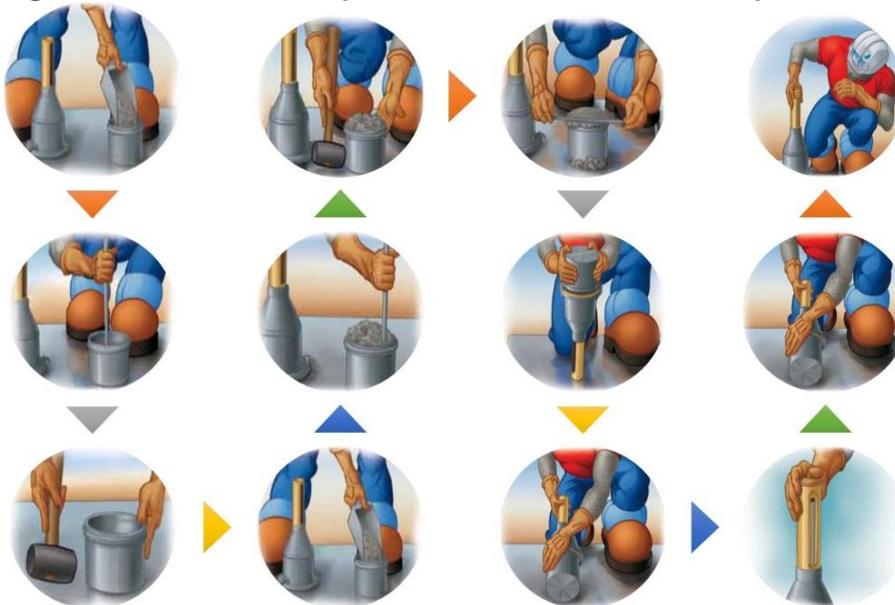
El método volumétrico, correspondiente a la NTC 1028, para determinar el contenido de aire sugiere la extracción de aire de una muestra de concreto agitándolo en un exceso de agua, dicha norma permite la utilización de este método sin importar el tipo de agregados, la presión atmosférica, la densidad de los materiales ni las proporciones de la mezcla. En la siguiente figura se ilustra el procedimiento del ensayo.

---

<sup>18</sup> INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. El Concreto en la Obra: Problemas, Causas y Soluciones: Determinación del contenido de aire del concreto recién mezclado por el método volumétrico. México: El Instituto, 2008. 60 p.

<sup>19</sup> RIVERA, Gerardo. Concreto Simple. Cali: Universidad del Cauca, 2010. 267 p.

**Figura 8. Procedimiento para la determinación de aire por el método volumétrico.**



Fuente. El Autor

Para el caso de este proyecto de investigación se usaron moldes de concreto de 10 cm de diámetro x 20 cm de altura, un medidor con 0.5L de agua, adicional, para garantizar la correcta medición se agito vigorosamente el medidor.

Ahora bien, Medina establece las cantidades recomendables de aire total (atrapado más incorporado) y promedio para la mezcla de concreto, de acuerdo a la NTC 1028

**Tabla 7. Cantidad de aire para mezcla de concreto**

Tamaño máximo del agregado grueso	Cantidad de aire recomendable (%)	Cantidad promedio de aire atrapado (%)
9.5 mm (3/8 in)	6 – 10	3.0
19.1 mm (3/4 in)	4 – 8	2.0
38.1 mm (1 ½ in)	3 – 6	1.0
76.2 mm (3 in)	1.5 – 4.5	0.3

Fuente. El Autor

La tolerancia en el contenido de aire del concreto se especifica en el orden de  $\pm 1.5\%$  Los datos de está tabla y la tolerancia, se toman como parámetros para determinar los resultados de las muestras ensayadas.

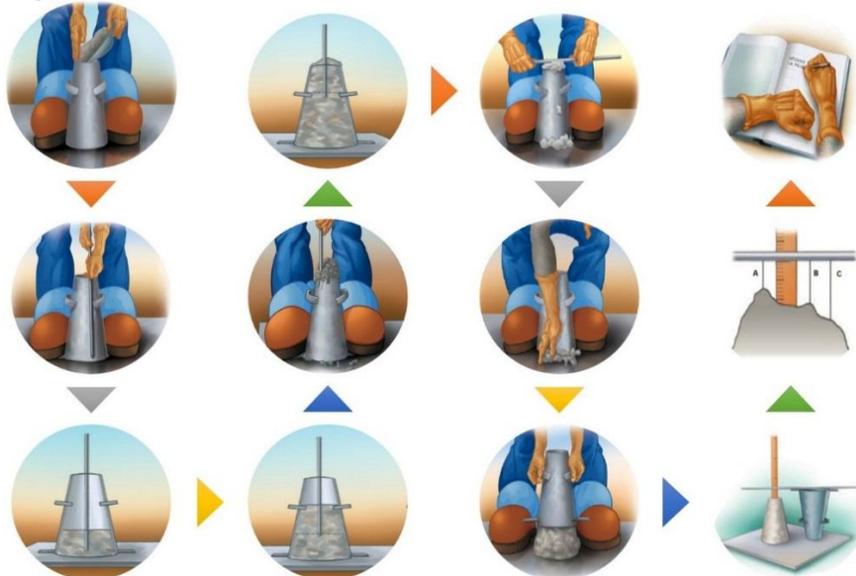
### 2.2.3 Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto

El concreto se diseña para tener una trabajabilidad, consistencia y plasticidad adecuada a las condiciones de trabajo, esto se traduce como la facilidad que resulta el colocar, compactar y darle acabado al concreto. Se mide mediante el cono de Abrams, en un lapso de máximo 5 minutos. La NTC – 396 describe el procedimiento de ensayo para determinar la fluidez de la siguiente manera:

Una muestra de concreto fresco se coloca en un molde tronco cónico y se compacta mediante una varilla. El molde se levanta permitiendo que el concreto se asiente. El asentamiento corresponde a la diferencia entre la posición inicial y la desplazada de la superficie superior del concreto. Las mediciones se deben tomar en el centro de la cara superior.<sup>20</sup>

En la siguiente figura se ilustra el procedimiento del ensayo.

**Figura 9. Procedimiento para la determinación del asentamiento – Cono de Abrams**



Fuente. El Autor

Si el concreto desciende de una forma uniforme se tienen un ensayo válido, pero si la mitad de la mezcla o más, se desliza hacia un mismo sentido se dice que se ha provocado una deformación por corte características de mezclas carentes de cohesión. En este caso debe repetirse el ensayo y verificar si sufre esta deformación.

Para el caso de este proyecto de investigación se usó un cono de 10 cm de diámetro en la parte superior y de 10 cm de diámetro en la parte inferior x 20 cm de altura, pasados 5 minutos se retiró el molde y se leyó la consistencia en cm

<sup>20</sup> INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas técnicas colombianas para la construcción. NTC 396 Bogotá: ICONTEC, 2013. 13 p.

El concreto fresco debe ser plástico o semifluido y capaz de ser moldeado a mano. Éste concreto no debe desmoronarse, sino por el contrario fluir como si fuese un líquido viscoso sin segregarse. La consistencia se mide en mm y/o cm y es la diferencia entre la altura del molde y la altura final de la mezcla, a esta medida se le conoce como revenimiento.

La plasticidad de la mezcla dependerá de las cantidades relativas de agua y cemento en la pasta. Una pasta con poca agua y mucho cemento será muy rígida, no podrá admitir la adición de los agregados sin llegar a ser enteramente inmanejable. Por el contrario, si el contenido de agua es alto y del cemento es bajo, la pasta puede llegar a ser tan fluida que no es capaz de impedir la segregación de los agregados (especialmente los de tamaños gruesos); los sólidos más pesados se asentarán y el agua se acumulará en la superficie de la mezcla produciendo un fenómeno conocido como exudación.<sup>21</sup>

Los parámetros de consistencia, de acuerdo al asentamiento en mm, que se establecen de acuerdo al uso y tipo de estructura, sugiriendo para cada caso un sistema de compactación adecuada, mencionados por Rivera, se presentan en la siguiente tabla, es importante realizar al menos tres ensayos para determinar la consistencia.

**Tabla 8. Parámetros de consistencia del concreto según su uso**

Consistencia	Asentamiento (mm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0 – 20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación.	Con vibradores de formaleta; concretos de proyección neumática (lanzados)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión.
Seca	20 – 35	Pavimentos.	Pavimentadora con terminadora vibratoria.	Secciones sujetas a vibración intensa.
Semi - seca	35 – 50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple. Losas poco reforzadas.	Colocación con máquinas operadas manualmente.	Secciones simplemente reforzadas con vibración.

<sup>21</sup> RIVERA, Gerardo. Concreto Simple. Cali: Universidad del Cauca, 2010. 267 p.

**Tabla 9. (Continuación)**

Media (plástica)	50 – 100	Pavimentos compactados a mano, losas, muros, vigas, columnas, cimentaciones.	Colocación manual.	Secciones simplemente reforzadas con vibración.
Húmeda	100 – 150	Elementos estructurales esbeltos o muy reforzados.	Bombeo.	Secciones bastante reforzadas con vibración
Muy Húmeda	150 – 200	Elementos esbeltos, pilotes fundidos “in situ”	Tubo embudo tremie.	Secciones altamente reforzadas sin vibración
Súper Fluida	Más de 200	Elementos muy esbeltos.	Auto – nivelante, auto - compactante.	Secciones altamente reforzadas sin vibración y normalmente no adecuados para vibrarse.

Fuente. RIVERA, Gerardo. Concreto Simple. Cali: Universidad del Cauca, 2010. 267 p.

#### **2.2.4 Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado**

Dentro del proceso de endurecimiento del concreto se presenta un estado en que la mezcla pierde apreciablemente su plasticidad y se convierte en un material de difícil manejo, a este estado se la llama *fraguado inicial de la mezcla*. Con el transcurrir del tiempo se produce el endurecimiento normal de la mezcla, y se presenta un nuevo estado en el cual la consistencia ha alcanzado un valor aceptable, denominado *fraguado final de la mezcla*. El lapso comprendido entre los dos estados se llama *tiempo de fraguado*.

En la NTC 121 se indica que el tiempo inicial de fraguado no debe ser menor de 45 min., y el final no debe ser mayor de 8h. Los resultados del tiempo de fraguado dependen de la temperatura ambiente, en un clima caliente fragua más rápidamente, mientras que en un clima frío el tiempo de fraguado es más lento. Para temperaturas menores de -12°C, no hay reacción química por lo tanto no se produce fraguado.<sup>22</sup>

De acuerdo a lo mencionado por Giraldo, los anteriores son los tiempos establecidos para un concreto convencional. Sin embargo, para el HPC es necesario rectificar si se cumple este parámetro. Es prudente advertir que durante este ensayo se debe tener en cuenta que:

<sup>22</sup> GIRALDO Bolívar, Orlando. Manual de Cementos Calcáreos. 2 ed. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2003. 66 p.

La reacción de endurecimiento es muy lenta, lo cual permite la evaporación de parte del agua necesaria para la hidratación del cemento, que se traduce en una notable disminución de la resistencia final. Es por ello que debe mantenerse húmedo el concreto recién colado, “curándolo”. También se logra evitar la evaporación del agua necesaria para la hidratación del cemento, cubriendo el concreto recién descimbrado con una película impermeable de parafina o de productos especiales que se encuentran en el mercado desde hace varios años.<sup>23</sup>

En la siguiente figura se ilustra el procedimiento del ensayo, de acuerdo con la NTC 890, en la cual se menciona que este método de ensayo:

Proporciona la determinación del tiempo de fraguado del concreto, con asentamiento mayor a cero, por medio de mediciones de resistencia a la penetración sobre el mortero tamizado de la mezcla de concreto, es apropiado para ser usado solamente cuando los ensayos de la fracción de mortero proporcionen la información requerida.

**Figura 10. Procedimiento para la determinación del tiempo de fraguado.**



Fuente. El Autor

Para el caso de este proyecto de investigación se usaron cilindros de 10 cm de diámetro x 20 cm de altura, los cuales se dejaron bajo un manto húmedo con el fin de garantizar el curado de la mezcla, los resultados se obtuvieron del promedio de penetraciones en las 3 muestras realizadas.

<sup>23</sup> MERCEDEZ M, Raúl E. Fraguado del concreto [en línea]. Barcelona: ARQHYS [citado 28 agosto, 2013]. Disponible en Internet <URL: <http://www.arqhys.com/construcción/concreto-fraguado.html>>

### 2.2.5 Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión

El Módulo de Elasticidad Estático, es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico. Es la pendiente de la secante definida por dos puntos de la curva del esfuerzo-deformación, dentro de esta zona elástica. *La Relación de Poisson*, es la relación entre las deformaciones transversal y longitudinal al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico.<sup>24</sup>

La norma técnica colombiana NTC 4025 establece que el método de ensayo presentado aquí consiste en la aplicación de una fuerza de compresión longitudinal sobre un espécimen de concreto cilíndrico a una velocidad que se encuentra dentro del intervalo prescrito hasta que ocurra la falla. Cuando esto ocurre se toman las medidas obtenidas en los deformímetros para el posterior cálculo. En la siguiente figura se ilustra el procedimiento del ensayo.

**Figura 11. Procedimiento para la determinación del módulo de elasticidad estático y relación de Poisson**



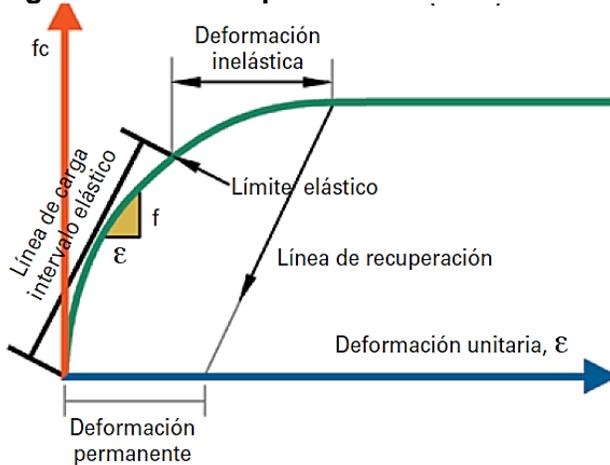
Fuente. El Autor

Para el caso de este proyecto de investigación se usaron cilindros de 10 cm de diámetro x 20 cm de altura, los cuales fueron sometidos a una fuerza axial aplicada por una máquina universal Forney con capacidad de 400.000 lbf. Para garantizar la correcta distribución de la carga por unidad de área se usaron almohadillas de neopreno para ensayos de compresión de concreto.

<sup>24</sup> INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, El Concreto en la Obra: Problemas, Causas y Soluciones: Determinación del Módulo de elasticidad estático y relación de Poisson

El concreto no es un material completamente elástico, esto se observa fácilmente al someter un espécimen cilíndrico de concreto a esfuerzos de compresión crecientes hasta llevarlo a la falla, para cada nivel de esfuerzo se registra la deformación unitaria del material y se grafica la curva que los relaciona.

**Figura 12. Curva Típica Esfuerzo-Deformación**



Fuente. INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. El Concreto en la Obra: Problemas, Causas y Soluciones: Determinación del Módulo de elasticidad estático y relación de Poisson. México: El Instituto, 2008. 60 p.

El módulo de elasticidad es un parámetro muy importante en el análisis de las estructuras de concreto ya que se emplea en el cálculo de la rigidez de los elementos estructurales, en algunos países demandan valores mínimos para el módulo de elasticidad dependiendo del tipo de concreto que se emplee en la obra, por lo tanto ahora, además de la  $f'_c$  se debe garantizar  $E_c$ .<sup>25</sup>

Cabe mencionar que tanto el módulo de elasticidad del concreto como el módulo de Poisson son parámetros sensibles que pueden diferir según los ingredientes del concreto, las condiciones climáticas de los ensayos y los métodos de prueba, por lo que se debe tener mucho cuidado en su determinación y uso. La norma colombiana sismo-resistente NSR – 10, Título C.8.5.1., establece:

El módulo de elasticidad,  $E_c$  para el concreto puede tomarse como  $w_c^{1.5} 0.043 \overline{f'_c}$  (en MPa), para valores de  $w_c$  comprendidos entre 1440 y 2560 kg/m<sup>3</sup>. Para concreto de densidad normal,  $E_c$  puede tomarse como  $4700 \overline{f'_c}$ . En caso de que no se disponga de un valor experimental el módulo de Poisson puede tomarse como 0.20 o calcularse a través de  $\nu = \frac{\epsilon_{tB} - \epsilon_{tA}}{\epsilon_B - 0.000050}$ , donde  $\epsilon_{tB}$  es la deformación transversal producida por un esfuerzo equivalente al 40% del

<sup>25</sup> CONSTRUCTOR CIVIL. Concreto: Módulo de Elasticidad [en línea]. Barcelona: La Empresa [citado 28 agosto, 2013]. Disponible en Internet <URL: <http://www.elconstructorcivil.com/2011/01/concreto-modulo-de-elasticidad.html>>

esfuerzo de rotura y  $\varepsilon_{tA}$  es la deformación transversal que se manifiesta con el esfuerzo que produce una deformación longitudinal de 50 millonésimas.<sup>26</sup>

Tomando las ecuaciones de la NSR - 10 y el proceso de NTC 4025, se determinan los parámetros para este ensayo.

### **2.2.6 Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión**

Las mezclas de concreto pueden ser diseñadas para que adquieran una amplia variedad de propiedades mecánicas y de durabilidad que cumplan con las exigencias de diseño de una estructura.

Esta propiedad del Concreto de Alto Desempeño se mide de igual manera que en el Concreto Convencional, utilizando la norma NCT 673 (ASTM C39). Esta norma describe el procedimiento de ensayo de cilindros sometidos a una carga axial inconfiada que al ser dividida entre el área bruta de la sección transversal del cilindro produce la resistencia a compresión del concreto. Este ensayo se puede realizar en cilindros de concreto de diferentes tamaños (7.5 cm x 15 cm, 10 cm x 20 cm y 15 cm x 30 cm), los cuales siempre deben cumplir una relación diámetro-alto de 1:2.<sup>27</sup>

Para el caso de este proyecto de investigación se usaron cilindros de 10 cm de diámetro x 20 cm de altura, los cuales fueron sometidos a una fuerza axial aplicada por una máquina universal Forney con capacidad de 400.000 lbf. Para garantizar la correcta distribución de la carga por unidad de área se usaron almohadillas de neopreno para ensayos de compresión de concreto.

---

<sup>26</sup> COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente. NSR – 10. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010. 1200 p.

<sup>27</sup> LÓPEZ YÉPES, Lucio Guillermo. 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. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Modalidad Trabajo de Grado, 2011. 140 p.

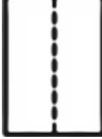
**Figura 13. Procedimiento para la determinación de la resistencia a la compresión.**



Fuente. El Autor

Antes de seguir adelante hay que considerar las posibles fallas que se presentan en los cilindros sometidos a compresión y las observaciones de cada una, la siguiente tabla ilustra lo dicho:

**Tabla 9. Diagrama de fallas en especímenes cilíndricos a compresión**

Tipo de falla	Observaciones
	Se observa cuando se logra una carga de compresión bien aplicada sobre un espécimen de prueba bien preparada.
	Se observa comúnmente cuando las caras de aplicación de carga se encuentra en límite de tolerancia especificada o excediendo esta.
	Se observa en especímenes que presentan una superficie de carga convexa y/o deficiencia del material de cabeceo: también por concavidad del plato de cabeceo o convexidad en una de las placas de carga.
	Se observa en especímenes que presentan una cara de aplicación cóncava y/o por deficiencia en el material de cabeceo o también por concavidad en una de las placas de carga.

**Tabla 10. (Continuación)**

	<p>Se observa cuando se producen concentraciones de esfuerzos en puntos sobresalientes de las caras de aplicación de carga, por deficiencias en el material de cabeceo, rugosidades en el plato o placas de cargas.</p>
	<p>Se observa en especímenes que presentan una cara de aplicación de carga convexa y/o por deficiencias del material de cabeceo, rugosidades en el plato cabeceador o placas de carga.</p>
	<p>Se observa cuando las caras de aplicación de carga del espécimen se desvían ligeramente de las tolerancias de paralelismo establecidas, o por ligeras desviaciones en el centro del espécimen para la aplicación de carga.</p>

Fuente. El Autor

Como se ha dicho, los resultados de las pruebas de resistencia a la 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.

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 siguiente tabla se observan los factores de probabilidad y porcentajes de ensayos con resistencias menores a la de diseño.

**Tabla 10. 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

**Tabla 11. (Continuación)**

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	

Fuente. El Autor

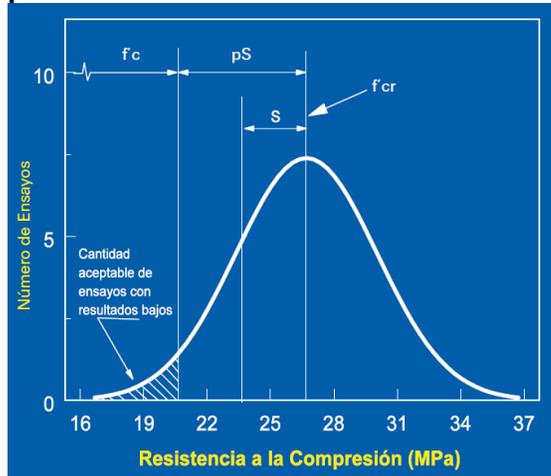
En la mayoría de los casos este valor corresponde al 1%, es decir que para que sólo uno de cada 100 ensayos tenga un valor menor que  $f'_c$ , el factor de probabilidad debe ser de 2.33.

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  $0.10 f'_c$  cuando  $f'_c$  es mayor que 35 MPa.<sup>28</sup>

Para cumplir con los requisitos de resultado de una prueba se debe diseñar en laboratorio una mezcla de concreto para una resistencia requerida  $f'_{cr}$ , que debe ser mayor a  $f'_c$ . La determinación de  $f'_{cr}$  se halla usando el factor de probabilidad  $p$  y la desviación estándar  $S$ .

**Figura 14. Desviación estándar y factor de probabilidad en el cálculo de probabilidad de la resistencia al concreto.**



Fuente. CAMPOSANO L, José. Control de Calidad en el Hormigón, Notas técnicas. Quito: Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Concreto, 2009. 15 p.

<sup>28</sup> CAMPOSANO L, José. Control de Calidad en el Hormigón, Notas técnicas. Quito: Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Concreto, 2009. 15 p.

En la figura anterior se muestra como para obtener la resistencia  $f'c$  con la cantidad aceptable de ensayos con resultados bajos, se requiere incrementar un valor  $pS$ , para obtener  $f'cr$ . Si la desviación estándar se ha calculado con mínimo treinta ensayos de resistencia, en la siguiente tabla se presentan las ecuaciones establecidas por el Instituto Americano del Concreto *ACI 318*, considerando que solo el 1% arroje resultados menores a  $f'c$  con  $p=2.33$ .

**Tabla 11. Ecuaciones para  $f'cr$  de acuerdo al ACI 318**

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

Fuente. El Autor

Si de los 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 siguiente tabla se anotan los valores establecidos por el ACI 318.

**Tabla 12. Factor de corrección para  $S$  según el número de ensayos**

No. Ensayos	Factor de corrección de la desviación estándar de la muestra	
	Resistencia requerida cuando no hay ensayos suficientes (MPa)	
Menos de 15	$f'c < 21$	$f'cr = f'c + 7.0$
	$21 \leq f'c \leq 35$	$f'cr = f'c + 8.3$
	$f'c > 35$	$f'cr = 1.1f'c + 5.0$
15	1.16	
20	1.08	
25	1.03	
30 o más	1.00	

Fuente. El Autor

La norma colombiana de construcciones Sismo-Resistentes también establece valores de resistencia requerida cuando los ensayos no son suficientes, la tabla a continuación resume lo determinado en el capítulo C.5.2 de la NSR-10:

**Tabla 13. Ecuaciones para  $f'_{cr}$  de acuerdo a la NSR-10 cuando se tienen menos de 15 ensayos**

<b><math>f'_c</math> (MPa)</b>	<b>Ecuación de <math>f'_{cr}</math> (MPa)</b>
$f'_c < 21$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.5$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = f'_c + 10$

Fuente. El Autor

De acuerdo con esto, esta investigación tendrá en cuenta el menor valor de  $f'_{cr}$ , obtenido ya sea de acuerdo a la norma ACI 318 o la NSR-10.

Se hizo hincapié en este último ensayo pues es el que más se analizará para poder determinar el modelo probabilístico del concreto de Alta Resistencia. A la postre, luego de haber establecido los parámetros de calidad o validez de cada ensayo, es importante analizar los resultados obtenidos para poder generar conclusiones y determinar finalmente el modelo.

### 3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En los capítulos sobre Estado del Conocimiento y Programa Experimental, se puede apreciar una gran cantidad de parámetros aplicados al concreto de alta resistencia al igual que se menciona el modelo probabilístico del concreto convencional. Así que con el fin de determinar el modelo probabilístico del HPC, se utilizaron resultados de ensayos de resistencia a compresión de dos diseños a cilindros de concreto con la caracterización de materiales descrita en el capítulo anterior.

#### 3.1 RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN PARA DISEÑOS DE HPC

En las siguientes figuras se observan los resultados de resistencia, obtenidos a 24 horas, 3 días, 7 días, 14 días, y 28 días, para una resistencia esperada  $f'c$  de 60 MPa, de dos diseños: 10035792 y 10035794.

**Figura 15. Evaluación de resistencias a compresión - Diseño 10035792.**

Ensayo No.	Fecha	Resistencia en MPa					Media Móvil	Requisitos	
		R24h	R3	R7	R14	R28		Móvil $\geq f'c$	Móvil $\geq f'c -3.5$
6545	26/10/2012	25,2	45,0	61,1		73,5			
6683	09/11/2012		60,9	74,5		88,8	86,5	SI	SI
6684	09/11/2012					97,2	93,7	SI	SI
1664	15/06/2013		60,7	78,7		95,1	90,1	SI	SI
1672	15/06/2013		50,9	61,0		77,9	81,2	SI	SI
1673	15/06/2013		47,5	65,8		70,7	75,8	SI	SI
1674	15/06/2013		48,3	63,1		78,8	75,8	SI	SI
1798	26/06/2013		55,4	69,8		78,0	83,4	SI	SI
1806	26/06/2013		49,7	69,1		93,3	87,6	SI	SI
1981	11/07/2013			72,0	84,9	91,6	93,8	SI	SI
1982	11/07/2013			69,9	81,6	96,6	94,2	SI	SI
2009	13/07/2013		59,1		71,0	94,3	89,3	SI	SI
2060	18/07/2013			60,6	62,3	77,0	85,8	SI	SI
2107	24/07/2013		56,6	75,1		86,1	74,8	SI	SI
2115	24/07/2013		38,8	52,0		61,4	78,0	SI	SI
2163	27/07/2013		50,9	70,8		86,4	77,0	SI	SI
2283	08/08/2013			55,5	72,6	83,1	88,2	SI	SI
2290	08/08/2013			65,2	73,4	95,2	92,1	SI	SI
2324	13/08/2013		57,9	76,0		97,9	93,7	SI	SI
2331	13/08/2013		51,9	78,1		88,1	89,5	SI	SI
2333	13/08/2013		50,4	70,6		82,4	80,9	SI	SI
2334	13/08/2013		43,6	61,7		72,1	80,4	SI	SI
2335	13/08/2013		49,8	65,5		86,7	79,4	SI	SI
2344	15/08/2013			87,7	97,7		86,7	SI	SI
2416	02/09/2013		65,8	80,2					
2428	02/09/2013	22,9	46,8	58,1					
2432	03/09/2013		58,2	76,7					

<b>Datos</b>	2	20	25	7	23	23
<b>Promedio</b>	24,1	52,4	68,7	77,6	84,9	85,1
<b>Desv</b>	1,656	6,763	8,559	11,492	9,892	6,474

Fuente. El Autor

**Figura 16. Evaluación de resistencias a compresión - Diseño 10035794.**

Ensayo No.	Fecha	Resistencia en MPa					Media Móvil	Requisitos	
		R24h	R3	R7	R14	R28		Móvil $\geq f'c$	Móvil $\geq f'c - 3.5$
3478	10/01/2012	24,9	56,8	74,9		79,1			
3479	11/01/2012	15,0	42,7	52,9		65,0	80,1	SI	SI
3487	11/01/2012	25,2	56,5	73,2		96,3	81,1	SI	SI
3488	12/01/2012	10,7	61,3	69,9		81,8	87,6	SI	SI
3500	12/01/2012	13,8	67,8	74,0		84,7	85,8	SI	SI
3524	16/01/2012	11,9	49,2	70,6		91,0	84,9	SI	SI
3529	16/01/2012	11,4	52,3	66,3		78,9	81,4	SI	SI
3534	17/01/2012	13,7	52,0	60,6		74,4	79,6	SI	SI
3539	17/01/2012	14,9	51,5	64,3		85,5	81,4	SI	SI
3544	18/01/2012	8,6	34,2	68,5		84,3	86,1	SI	SI
3549	18/01/2012	13,1	44,0	66,3		88,5	80,5	SI	SI
3552	19/01/2012	11,8	48,0	55,5		68,7	74,1	SI	SI
3556	19/01/2012	15,7	47,8	53,9		65,0	74,2	SI	SI
3560	20/01/2012	23,5	52,6	73,6		88,9	81,8	SI	SI
3563	20/01/2012	14,2	55,5	70,0		91,5	88,8	SI	SI
3580	23/01/2012	16,6	58,2	77,5		85,9	88,3	SI	SI
3589	23/01/2012	23,2	52,8	80,9		87,5	85,6	SI	SI
3593	24/01/2012	18,2	63,9	75,9		83,2	87,5	SI	SI
3600	24/01/2012	10,6	50,3	75,5		91,8	88,0	SI	SI
3608	25/01/2012	8,5	55,0	73,5		88,9	89,7	SI	SI
3614	25/01/2012	20,7	52,6	71,8		88,5	91,2	SI	SI
3617	26/01/2012	25,6	67,9	74,4		96,2	90,9	SI	SI
3624	26/01/2012		56,9	61,5		88,2	89,4	SI	SI
3632	27/01/2012	19,5	58,7	64,6		83,9	89,0	SI	SI
3806	14/02/2012		53,1	74,7		94,9	86,6	SI	SI
3857	20/02/2012		51,2	61,8		81,0	88,9	SI	SI
3991	02/03/2012	25,0	62,2	70,8		90,8	91,1	SI	SI
4118	13/03/2012	27,0	43,8	78,0		101,5	96,9	SI	SI
4154	15/03/2012	24,3		75,8	91,1	98,5	96,0	SI	SI
4260	26/03/2012	25,3	58,4	69,6		88,0	90,3	SI	SI
4649	28/04/2012		59,1	73,8		84,3	84,0	SI	SI
4853	18/05/2012	7,1	39,7	65,3		79,7	81,6	SI	SI
4864	18/05/2012		37,1	61,3		80,7	76,8	SI	SI
5277	28/06/2012	13,4		52,0	60,7	70,0	82,4	SI	SI
5519	21/07/2012		54,8	65,5		96,5	84,7	SI	SI
5533	21/07/2012		48,1	66,2		87,6	87,7	SI	SI
6457	18/10/2012	10,9	52,8	61,3		79,1	80,7	SI	SI
6458	18/10/2012		56,1	65,0		75,5			

<b>Datos</b>	30	36	38	2	38	36
<b>Promedio</b>	16,8	52,9	68,2	75,9	84,9	85,4
<b>Desv</b>	6,161	7,684	7,328	21,454	8,794	5,329

Fuente. El Autor

Las últimas dos columnas corresponden a los requisitos de aceptabilidad establecidos por el ACI 318, donde:

- (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 0.10  $f'c$  cuando  $f'c$  es mayor que 35 MPa.<sup>29</sup>

Adicional a esto es oportuno mencionar que las resistencias dentro de la tabla para cada edad del concreto son el promedio de mínimo 3 cilindros ensayados.

### 3.2 METODOLOGÍA PROBABILÍSTICA

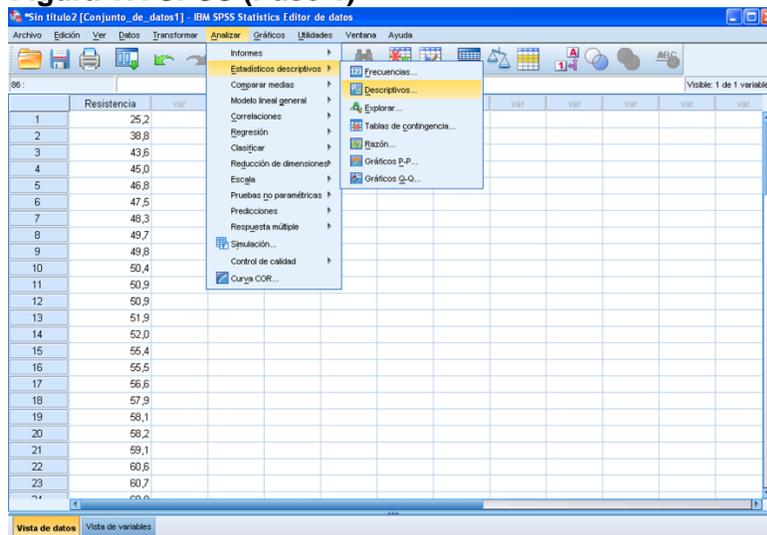
La metodología desarrollada en este trabajo permite la determinación del método probabilístico de los diseños de concretos establecidos anteriormente.

El software de programación utilizado fue *SPSS Statical Data Analysis* que permite trabajar con bases de datos de gran escala y una interfaz gráfica para el ingreso de datos de una forma sencilla y amigable.

Luego de ingresar la información correspondiente a resistencias, se siguen los siguientes pasos en el programa:

1. En la barra del menú, se toma la opción *Analizar*, allí se toma la opción *Estadísticos Descriptivos*, seguido de *Frecuencias*.

Figura 17. SPSS (Paso 1)

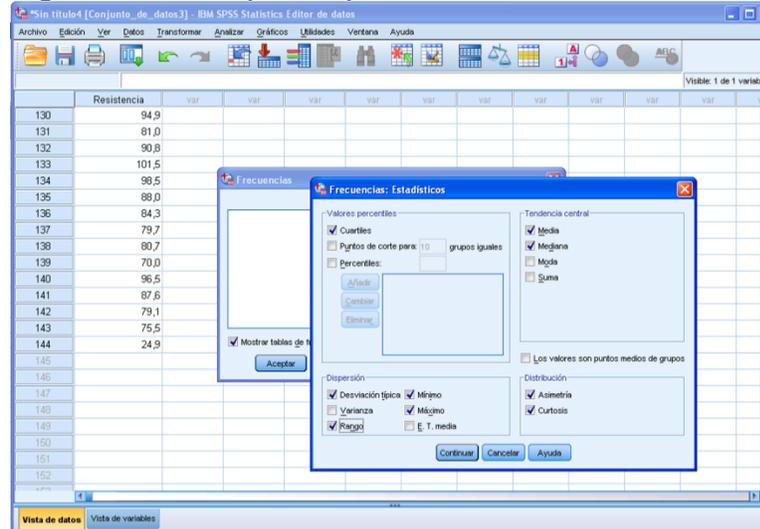


Fuente. El Autor

2. De esta selección aparece una ventana se selecciona *Estadísticos*, para configurar las opciones que sean necesarias para el modelo a encontrar, al finalizar la selección se da clic en continuar.

<sup>29</sup> CAMPOSANO L, José. Control de Calidad en el Hormigón, Notas técnicas. Quito: Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Concreto, 2009. 15 p.

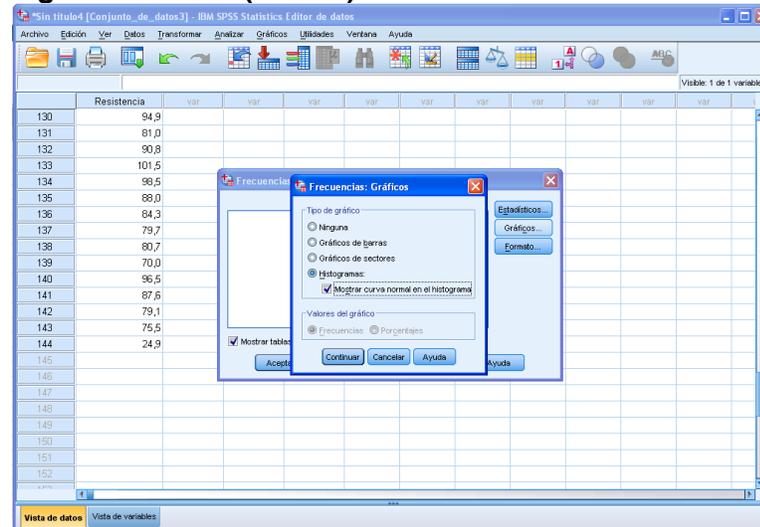
**Figura 18. SPSS (Paso 2)**



Fuente. El Autor

- Posteriormente se toma la opción *Gráficos*, la cual permite generar un histograma de frecuencia para conocer la forma de la función de densidad de probabilidad de la población de resistencia. A su vez almacena el cálculo de la media y de la desviación estándar.

**Figura 19. SPSS (Paso 3)**

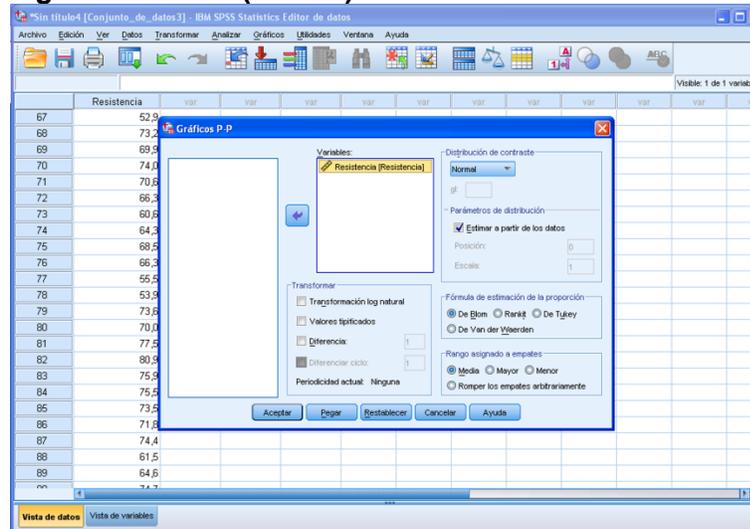


Fuente. El Autor

- Para decidir si la muestra procede o no de una distribución normal existen los gráficos P-P y Q-Q, la diferencia entre estos es que los gráficos P-P confrontan proporciones acumuladas de una variable, con las de una distribución normal. Los gráficos Q-Q representando los cuantiles respecto a los cuantiles de la distribución normal; consisten en mostrar los datos en referencia a una línea recta, entre más cerca estén los datos de ésta se

puede afirmar que poseen una distribución normal, para ello, se señaló en la barra del menú, la opción *Analizar* y allí opción *Gráficos P-P* o *Gráficos Q-Q*.

**Figura 20. SPSS (Paso 4)**



Fuente. El Autor

Luego de estos pasos el programa genera una ventana con el título resultados, donde desglosa toda la información solicitada.

### 3.3 RESULTADOS PROBABILÍSTICOS ARROJADOS POR SPSS

A continuación se presentan los resultados arrojados por el programa estadístico para los dos tipos de diseño

#### 3.3.1 Diseño 10035792

En la primera tabla de estadísticos arrojados por el programa SPSS, se miran los parámetros más relevantes para tantee a primera vista si la distribución de los datos tiene una tendencia probabilística normal, los parámetros son Curtosis y Asimetría entre el rango de -0.5 a 0.5.

**Tabla 14. Resultados estadísticos Diseño 10035792**

N	Válidos	77
	Perdidos	0
Media		68,968
Mediana		70,577
Desv. típ.		16,7958
<b>Asimetría</b>		<b>-,289</b>
Error típ. de asimetría		,274

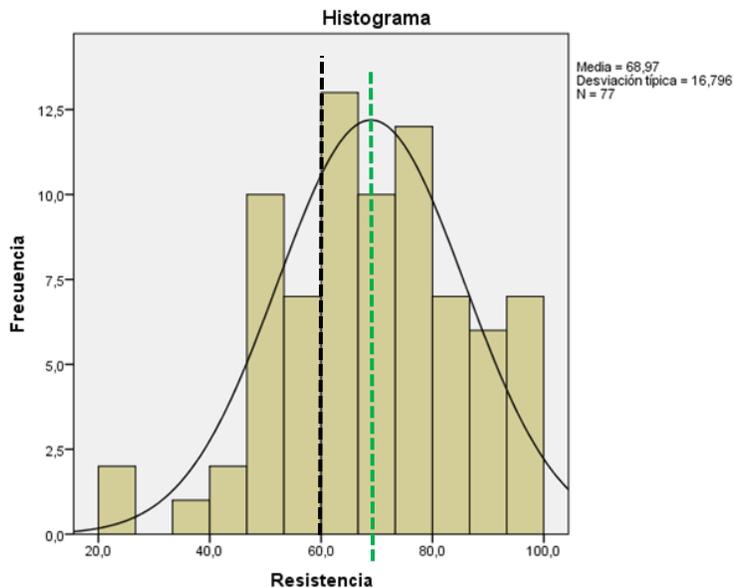
**Tabla 15. (Continuación)**

<b>Curtosis</b>	<b>-,118</b>
Error típ. de curtosis	,541
Rango	75,0
Mínimo	22,9
Máximo	97,9
25	57,968
Percentiles 50	70,577
75	80,875

Fuente. El Autor

A primera vista podemos afirmar que la población de resistencias obtenidas en el diseño 10035792 tiene una distribución normal. Sin embargo, esto se verifica con el histograma de frecuencias.

**Figura 21. Histograma de frecuencias Diseño 10035792**

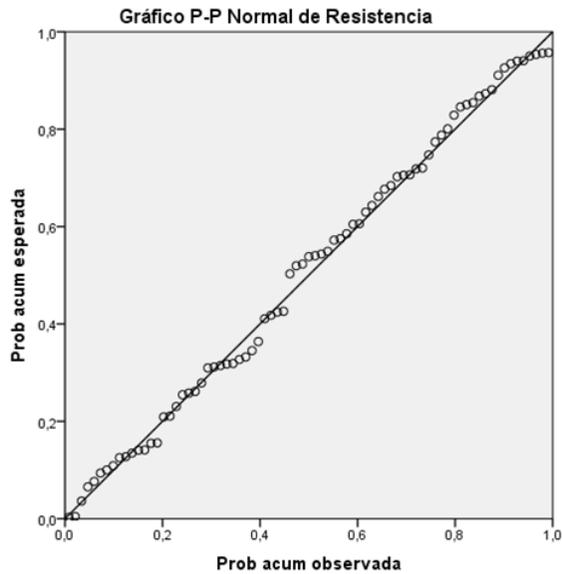


Fuente. El Autor

La variación entre el concreto esperado y el pico de la curva normal, corresponde a la desviación estándar, que para el caso tiene un valor de 16,7958.

El gráfico P-P obtenido en el programa nos permite confirmar que tiene una distribución normal, al igual que la del concreto convencional.

**Figura 22. Gráfico P-P Normal Diseño 10035792**



Fuente. El Autor

### 3.3.2 Diseño 10035794

Al igual que en el diseño anterior, se miran que los parámetros de Curtosis y Asimetría estén entre el rango de -0.5 a 0.5 para saber si tiene una tendencia normal.

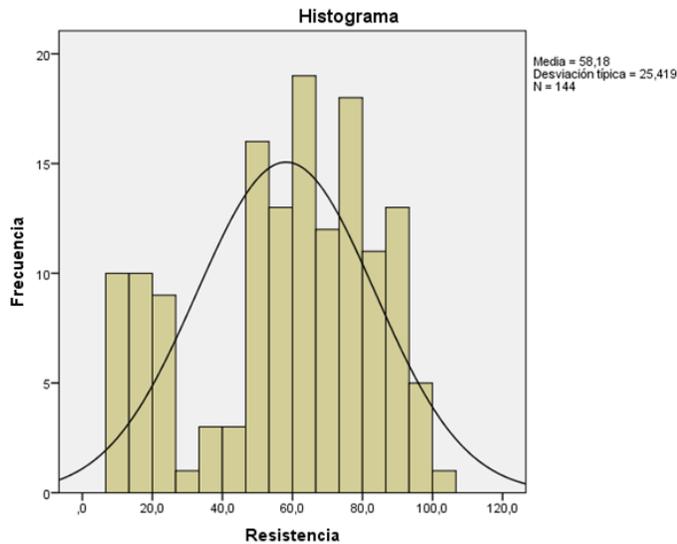
**Tabla 15. Resultados estadísticos Diseño 10035794**

N	Válidos	144
	Perdidos	0
Media		58,177
Mediana		61,995
Desv. típ.		25,4189
<b>Asimetría</b>		<b>-,534</b>
Error típ. de asimetría		,202
<b>Curtosis</b>		<b>-,731</b>
Error típ. de curtosis		,401
Rango		94,4
Mínimo		7,1
Máximo		101,5
	25	44,952
Percentiles	50	61,995
	75	77,067

Fuente. El Autor

A primera vista podemos afirmar que la población de resistencias obtenidas en el diseño 10035794 no tiene una distribución normal. Y esto debe evidenciarse en el histograma de frecuencias.

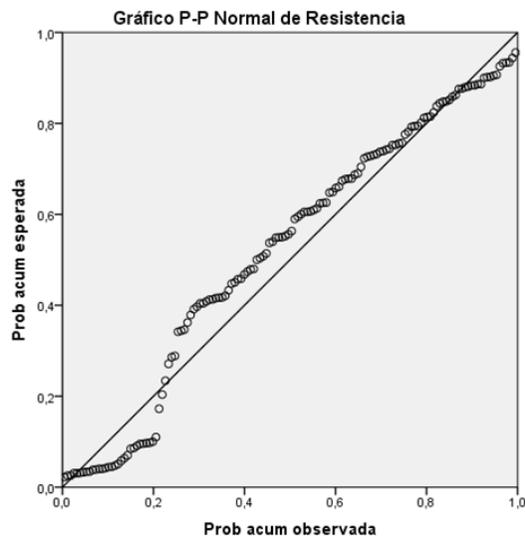
**Figura 23. Histograma de frecuencias Diseño 10035794**



Fuente. El Autor

Como se observa en la figura anterior la distribución de los datos de resistencia obtenidos en este diseño no tienen una tendencia normal, para ver o correlación entre las variables y la normal recurrimos a los gráficos P-P.

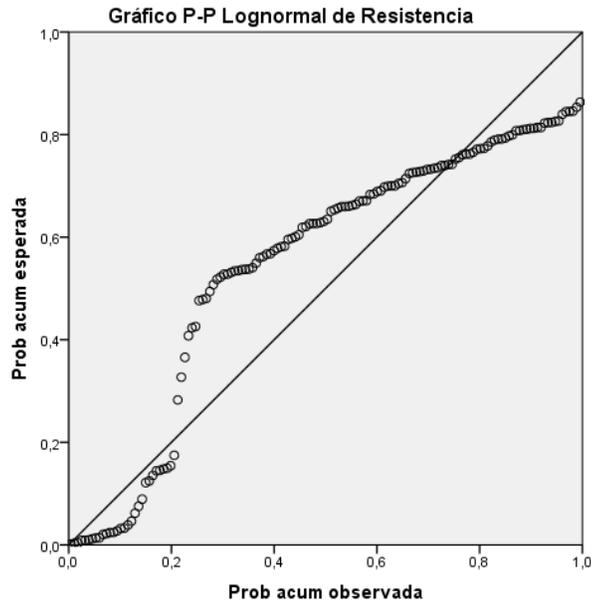
**Figura 24. Gráfico P-P Normal Diseño 10035794**



Fuente. El Autor

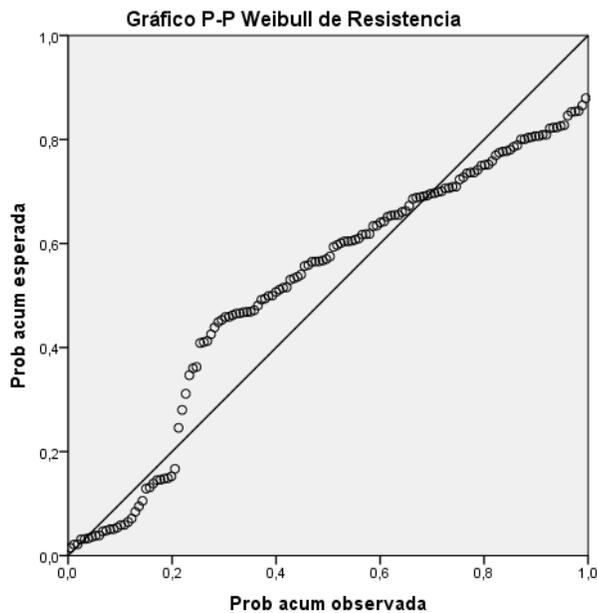
Ya que no cumple con la distribución normal, se analizaron en el programa diversos gráficos P-P para este grupo de datos de distribuciones como la log-normal y la weibull, a continuación se presenta los resultados obtenidos:

**Figura 25. Gráfico P-P LogNormal Diseño 10035794**



Fuente. El Autor

**Figura 26. Gráfico P-P Weibull Diseño 10035794**

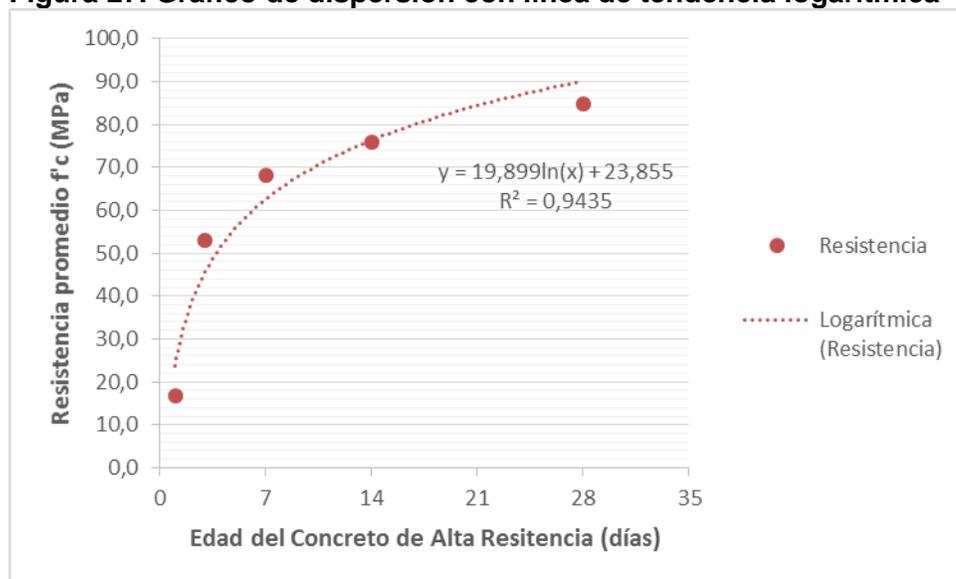


Fuente. El Autor

De acuerdo con estos gráficos las opciones de que este diseño tenga una distribución Normal, LogNormal o de Weibull, no son factibles.

A raíz de esto se decidió hacer un análisis de las resistencias por medio de un gráfico de dispersión donde se contrastaron los promedios de resistencias obtenidas para cada edad de concreto con su edad correspondiente, la idea es observar cual tendencia me arroja un mayor coeficiente de determinación, cuyo principal propósito es determinar la calidad del modelo para replicar los resultados, para así predecir futuros resultados o testear hipótesis. A continuación se presentan los resultados:

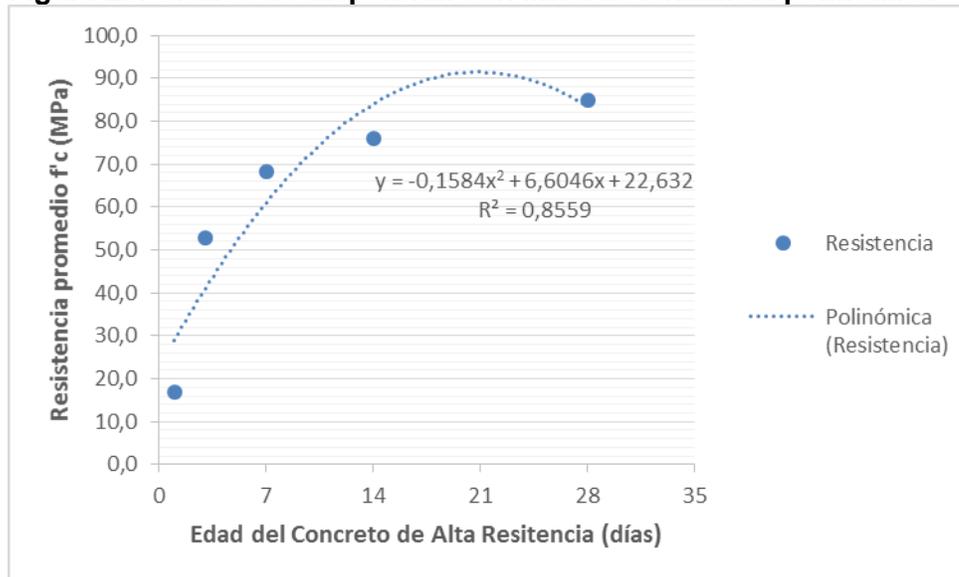
**Figura 27. Gráfico de dispersión con línea de tendencia logarítmica**



Fuente. El Autor

La gráfica anterior tiene un coeficiente de determinación de 0.9435, lo que me indica que los datos pueden expresarse por medio de la tendencia logarítmica.

**Figura 28. Gráfico de dispersión con línea de tendencia polinómica**



Fuente. El Autor

La gráfica anterior tiene un coeficiente de determinación de 0.8559, que es menor a la obtenida por la tendencia polinómica.

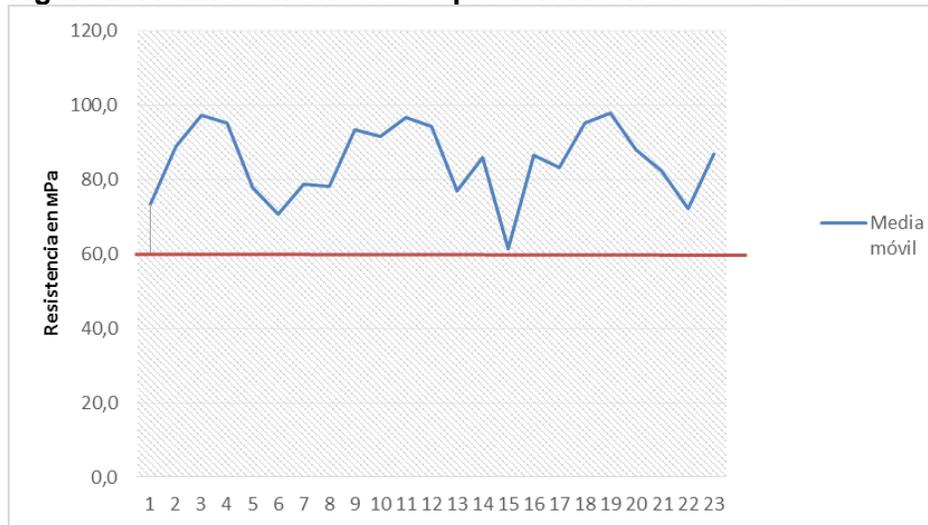
### 3.4 REQUISITOS DE ACEPTABILIDAD DEL CONCRETO - ACI 318

Al inicio de este capítulo se aclaró que para control de calidad del concreto se efectúa una función de registros de su resistencia a la compresión de acuerdo a dos parámetros que se podían observar en las últimas dos columnas de la tabla de *Evaluación de resistencias a compresión* para cada uno de los diseños, a continuación se presentan las gráficas que se utilizan comúnmente para que se considere satisfactorio el ensayo.

#### 3.4.1 Gráficas de los requisitos para el diseño 10035792

El siguiente gráfico ilustra de forma clara como todos los datos de este diseño cumplen con el primer criterio de aceptación, en donde el promedio aritmético de tres ensayos de resistencia consecutivos (media móvil) es igual o superior a  $f'c = 60$  MPa.

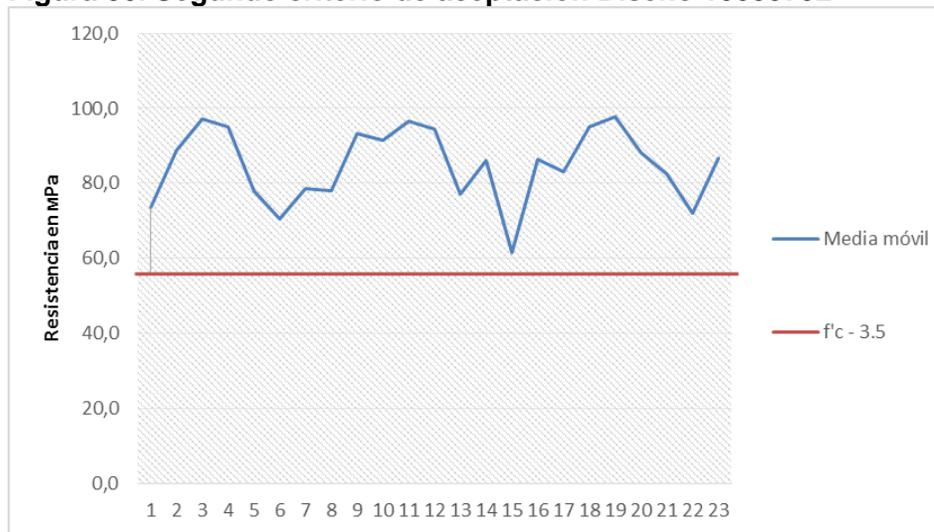
**Figura 29. Primer criterio de aceptación Diseño 10035792**



Fuente. El Autor

El siguiente gráfico ilustra de forma clara como todos los datos de este diseño cumplen con el segundo criterio de aceptación, en donde ningún ensayo de resistencia puede ser menor que  $f'c-3.5 = 56.5$  MPa.

**Figura 30. Segundo criterio de aceptación Diseño 10035792**

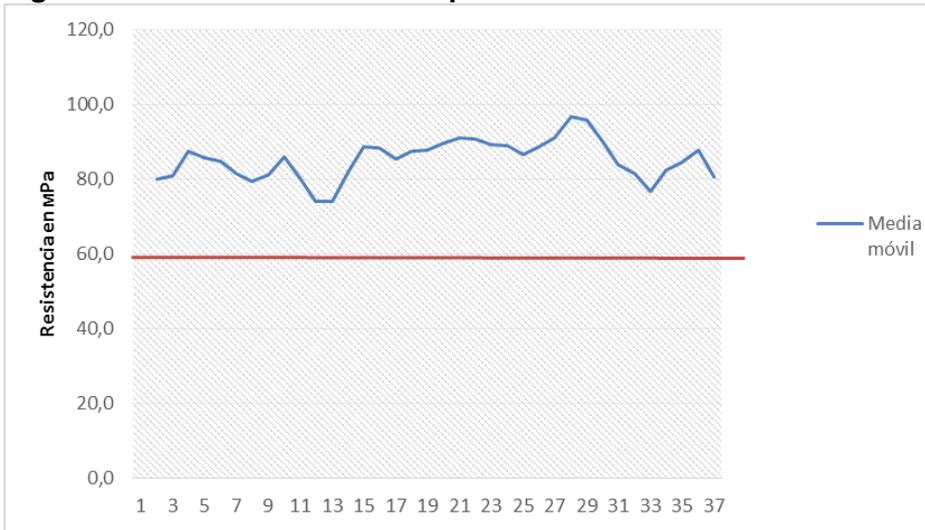


Fuente. El Autor

### 3.4.2 Gráficas de los requisitos para el diseño 10035794

El siguiente gráfico ilustra de forma clara como todos los datos de este diseño cumplen con el primer criterio de aceptación, en donde el promedio aritmético de tres ensayos de resistencia consecutivos (media móvil) es igual o superior a  $f'c = 60$  MPa.

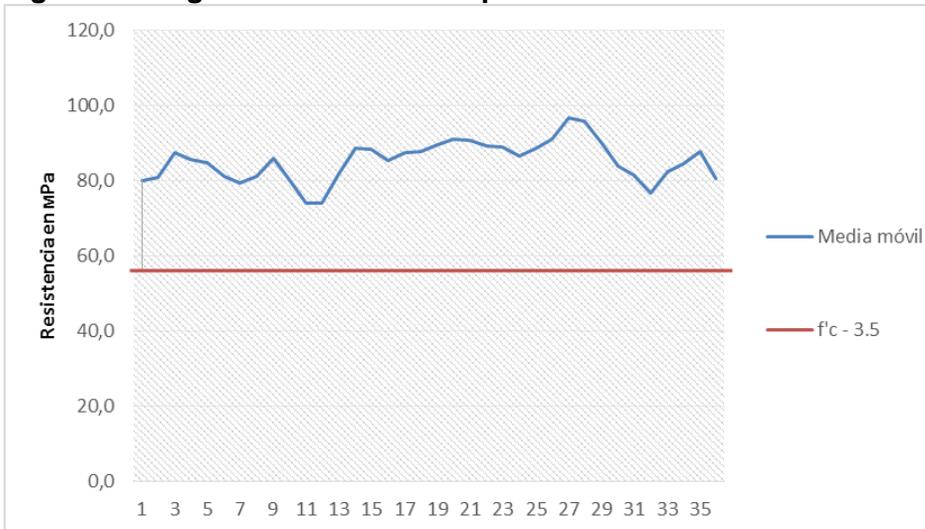
**Figura 31. Primer criterio de aceptación Diseño 10035794**



Fuente. El Autor

El siguiente gráfico ilustra de forma clara como todos los datos de este diseño cumplen con el segundo criterio de aceptación, en donde ningún ensayo de resistencia puede ser menor que  $f'c-3.5 = 56.5$  MPa.

**Figura 32. Segundo criterio de aceptación Diseño 10035794**



Fuente. El Autor

## CONCLUSIONES

- Este tipo de concreto evidencia la importancia de la generación de nuevos proyectos de construcción y la necesidad de validar científicamente prácticas empleadas habitualmente en el ejercicio de la construcción.
- El costo del HPC es mucho mayor al de un concreto convencional, debido a la presencia de diversos aditivos y la baja relación A/C; pero el beneficio en la disminución de tiempo en alcanzar resistencias altas, y en la disminución de grandes secciones estructurales y la durabilidad que tiene, lo hace también una buena opción a tomar en cuenta.
- La metodología probabilística para el análisis del HPC proporciona resultados que contienen una información más completa y realista sobre el nivel de resistencia de la mezcla.
- El modelo probabilístico del HPC puede variar de acuerdo a varios factores entre ellos está: la resistencia exigida, que para el caso de los diseños evaluados fue de 60 MPa; la zona en la cual se requiere el material, ya sea en un clima cálido o en clima frío; y las especificaciones requeridas para el proyecto. Esto se evidencio 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 de *Histograma de frecuencias Diseño 10035792*, en donde se evidencia que el pico de la curva normal está separada de los 60 MPa.
- El concreto de Alta Resistencia puede llegar a tener la misma distribución normal o gaussiana del concreto convencional. Lo cual se evidencio con el *Histograma de frecuencias Diseño 10035792*.
- 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 en la tabla de *Principales causas de variaciones de resistencia del concreto*.
- Los requisitos de aceptabilidad establecidos por el ACI 318, se cumplen a cabalidad en los dos diseños estudiados.
- Los parámetros de sesgo y curtosis permiten fácilmente aprobar o descartar un modelo estadístico.

- Existen varios métodos de evaluación de modelos estadísticos, los presentados en esta investigación fueron los gráficos P-P.
- La realización de diversos ensayos en laboratorio no fueron posibles, por lo cual se tomaron datos suministrados por Holcim Colombia S.A. para la realización de esta tesis.

## RECOMENDACIONES

- Realizar estudios con otras adiciones y materiales, con el fin de observar las influencias de éstas en las propiedades analizadas en este documento y se extiende la posibilidad de desarrollar nuevas técnicas para lograr un avance en el diseño de concretos de alta resistencia a partir de nuevas y mejores alternativas en el campo profesional de la ingeniería.
- Estudiar que los materiales sean certificados, ya que en muchas ocasiones, por ejemplo, se establecen condiciones que cualquier cantera puede cumplir y no necesariamente éstas son certificadas, lo que varía el resultado de resistencia del Concreto de Alta Resistencia.
- Establecer con anterioridad o previos al trabajo de grado los convenios necesarios para que los estudiantes de la Universidad Católica puedan realizar y desarrollar de la mejor forma su tesis.

## BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. Reported by ACI Committee 363. Miami: The Institute, 1993. 374 p.

CAMPOSANO L, José. Control de Calidad en el Hormigón, Notas técnicas. Quito: Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Concreto, 2009. 15 p.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente. NSR – 10. Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010. 1200 p.

CONSTRUCTOR CIVIL. Concreto: Módulo de Elasticidad [en línea]. Barcelona: La Empresa [citado 28 agosto, 2013]. Disponible en Internet <URL: <http://www.elconstructorcivil.com/2011/01/concreto-modulo-de-elasticidad.html>>

ESCORCIA, Olavo. Manual para la investigación. Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia, 2006. 41 p.

GIRALDO Bolívar, Orlando. Manual de Cementos Calcáreos. 2 ed. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2003. 66 p.

GÓMEZ MARTÍNEZ, M. Á. (2011). Diseño Estructural de Edificios Altos Tipo Torre Empleando Concreto de Alta Resistencia. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. Modalidad Trabajo de Grado, 2011. 187 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Concretos - Agua Para La Elaboración De Concreto. NTC 3459. Bogotá: ICONTEC, 2001. 7 p.

------. Procedimiento Recomendado para la Evaluación de los Resultados de los Ensayos de Resistencia del Concreto. NTC 2275. Bogotá: ICONTEC, 2013. 8 p.

------. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto. NTC 396. Bogotá: ICONTEC, 1992. 5 p.

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO. El Concreto en la Obra: Problemas, Causas y Soluciones: Determinación del contenido de aire del concreto recién mezclado por el método volumétrico. México: El Instituto, 2008. 60 p.

------. El Concreto en la Obra: Problemas, Causas y Soluciones: Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto. México: El Instituto, 2008. 60 p.

-----. El Concreto en la Obra: Problemas, Causas y Soluciones: Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de concreto. México: El Instituto, 2008. 60 p.

-----. El Concreto en la Obra: Problemas, Causas y Soluciones: Tiempo de fraguado de mezclas de concreto. México: El Instituto, 2008. 60 p.

-----. El Concreto en la Obra: Problemas, Causas y Soluciones: Determinación del Módulo de elasticidad estático y relación de Poisson. México: El Instituto, 2009. 71 p.

LÓPEZ YÉPES, Lucio Guillermo. 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. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería. Modalidad Trabajo de Grado, 2011. 140 p.

MEDINA RESTREPO. Carlos Andrés. Concreto confeccionado con aguas lluvia: Un aporte a la disminución del impacto ambiental generado por la industria de la construcción. Medellín: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Arquitectura. Modalidad trabajo de grado, 2013. 48 p.

MERCEDEZ M, Raúl E. Fraguado del concreto [en línea]. Barcelona: ARQHYS [citado 28 agosto, 2013]. Disponible en Internet <URL: <http://www.arqhys.com/construcción/concreto-fraguado.html>>

RIVERA, Gerardo. Concreto Simple. Cali: Universidad del Cauca, 2010. 267 p.

RIVVA LÓPEZ, Enrique. Concreto de Alta Resistencia. Lima: Instituto de la Construcción y Gerencia, 2002. 150 p.