UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Seguimiento del análisis estadístico de la resistencia del concreto a la compresión.

Jorge Antonio Franco Vásquez.

Informe de práctica para optar el título de Ingeniera Civil

Modalidad de Práctica

Semestre de Industria

Asesores

Carlos Alberto Riveros Jerez, Ingeniero Civil.

Juan Guillermo Rodríguez Gómez, Ingeniero Civil.

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Medellín

2025

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Cita	(Franco, 2025)
Referencia **Estilo APA 7 (2020)**	Franco, J. (2025). *Seguimiento del análisis estadístico de la resistencia del concreto a la compresión* [Semestre de industria]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.







Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por ser mi guía en cada paso y mi refugio en los momentos difíciles. Gracias por darme la sabiduría, la fortaleza y la resiliencia para no rendirme, incluso cuando las circunstancias parecían imposibles. Este logro es el reflejo de tu presencia constante en mi vida y de la fe que me sostuvo hasta el final.

Agradecimientos

Agradezco primeramente a Dios, mi roca firme y mi guía constante, por sostenerme en los momentos difíciles y permitirme crecer y elevarme como persona en cada etapa de este camino. Mil agradecimientos a mi madre, Yomaira, y a mi padre, Jorge, por sus sacrificios, su amor y su apoyo incondicional durante este camino que no siempre fue fácil, pero que juntos supimos recorrer. Agradecimientos a mis hermanas que brindaron apoyo moral, siempre presente cuando más lo necesité. Y por último, un agradecimiento especial a Don Juan que aportó muchos granos de arenas en una etapa de mi vida para que este logro se hiciese realidad.

Tabla de contenido

Resumen 9

Abstract 10

1. Introducción 11

2. Objetivos 13

2.1 Objetivo general 13

2.2 Objetivos específicos 13

3. Marco teórico. 14

3.1. Análisis estadístico del ensayo de resistencia a la compresión. 14

3.2. Conceptos fundamentales 15

4. Metodología 19

4.1. Recolección de datos. 19

4.2. Limpieza de datos. 21

4.3. Cálculos estadísticos. 21

4.3. Generación de curva distribución normal. 24

4.4. Evaluación de control de calidad. 27

5. Análisis de resultados. 32

5.1 Análisis de criterios de resistencia. 32

5.2. Análisis estadístico de la resistencia a la compresión. 34

5.3.Generación de curvas de distribución de resistencia. 38

5.4. Cartas para el control de calidad para el concreto. 41

6.Conclusiones 44

Referencias 46

Anexos 47

Anexo1: Poster. 47

Lista de tablas

Tabla 1. Tabla de ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días. 20

Tabla 2. Tabla de resistencias promedios individuales y cumplimiento 33

Tabla 3. Análisis Estadístico de la resistencia a la compresión 34

Tabla 4. Criterio de aceptación para concretos $f'_c \leq 35$ MPa. 36

Tabla 5. Análisis estadístico de curva de distribución normal. 39

Tabla 6. Prueba de Kolmogorov- Smirnov. 40

Lista de figuras

Figura 1. Fuentes principales de variaciones de la resistencia. 16
Figura 2. Distribución tipo normal de frecuencia de resultados de resistencia. 17
Figura 3. Curvas normales de frecuencia para diferentes desviaciones estándar. 17
Figura 4. Factor de modificaciones para desviación estándar. 22
Figura 5. Factores para el cálculo de la desviación estándar dentro de la tanda a partir del Intervalo de ensayos. 23
Figura 6. Distribución de frecuencia de los datos de resistencia y su correspondiente Distribución normal supuesta. 25
Figura 7. Curvas de frecuencia normal de tres distribuciones diferentes con la misma media pero con variabilidad diferente. 25
Figura 8. Normas de control a partir de método de la desviación estándar. 27
Figura 9. Normas de control a partir del método del coeficiente de variación dentro del ensayo. 27
Figura 10. Ecuaciones para determinar el promedio mínimo requerido según criterios 28
Figura 11. Probabilidad asociada con valores de z. 29
Figura 12. Carta de control, Ensayos de resistencia individual. 30
Figura 13. Carta de control, promedio móvil de ensayos consecutivos 30
Figura 14. Estándares de control del concreto para f5c´≤ 35 MPa. 37
Figura 15. Distribución de frecuencias de los resultados de promedios de resistencia. 38
Figura 16. Gráfica de campana de gauss ajustada a los resultados promedios de resistencia 39
Figura 17. Gráfica de resistencia simple. 41
Figura 18. Gráfica de promedio móvil. 42

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ACI	American Concrete Institute.
NTC	Norma Técnica Colombiana.
NSR-10	Norma Sismo Resistente 2010.
ICONTEC	Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.
f'c	Resistencia especificada del concreto.
f'cr	Resistencia promedio requerida del concreto.
σ (s)	Desviación estándar.
V	Coeficiente de variación.
X	Factor estadístico para desviación estándar dentro de la tanda.
d_2	Rango de resistencias en una tanda.

Resumen.

El presente trabajo tiene como objetivo principal realizar un seguimiento estadístico del comportamiento de los cilindros de concreto tomados en una obra de urbanismo y pavimentación, con el fin de evaluar la resistencia a la compresión y, de esta manera verificar el control de calidad del material suministrado desde que inició la obra hasta su fecha de finalización. El proceso se realizó gracias al análisis de datos recopilados y proporcionados por la empresa Estructuras y pavimentos S.A.S, encargada de construir andenes y accesos en el municipio de Itagüí, usando concreto con resistencia de 21 MPa y 27 MPa, respectivamente. La empresa reporta seis especímenes de concreto cada vez que se realiza un proceso de vaciado, y los resultados de resistencia quedan registrados en diferentes tiempos de fraguado: 7 días, 14 días y 28 días de fraguado.

El trabajo técnico fue desarrollado en Excel y se basó en criterios de normativas vigentes, bases fundamentales para su realización, tales como Las normas *NSR-10*, las normas *ACI (American Concrete Institute)* y las *NTC (Normas Técnicas Colombianas)*, garantizando así la rigurosidad técnica y normativa del trabajo desarrollado.

Palabras clave: cilindros, resistencia, compresión, control de calidad, análisis, especímenes, fraguado.

Abstract.

This technical study aims to conduct a statistical monitoring of the behavior of concrete cylinders used in an urban development and paving project in the municipality of Itagüí, in order to evaluate compressive strength and verify the quality control of the material supplied throughout the execution of the work. The analysis was carried out using data provided by *Estructuras y Pavimentos S.A.S.*, corresponding to 21 MPa and 28 MPa concrete specimens tested at 7, 14, and 28 days. The statistical process was developed in Excel and based on the guidelines established by the NSR-10, the *American Concrete Institute (ACI)* standards, and the *Normas Técnicas Colombianas (NTC)*, ensuring technical and regulatory rigor. The results obtained allowed the assessment of the concrete performance and its compliance with the required quality standards for the construction of sidewalks and urban access roads.

Keywords: cylinders, strength, compressive, quality control, analysis, specimens.

1. Introducción.

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la construcción por su resistencia, versatilidad y durabilidad. La NTC 2275 (ICONTEC) lo define como "una masa endurecida de materiales heterogéneos, que está sujeta a la influencia de numerosas variables; las características de cada componente, según su variabilidad, pueden ocasionar diferencias en la resistencia del concreto". Esto implica que, en cada proceso de producción o colocación, pueden surgir variaciones que afectan la calidad del material. Por ello es fundamental mantener un estricto control, en particular sobre la resistencia a la compresión, una propiedad clave para garantizar la durabilidad y la capacidad de carga de las estructuras.

Para asegurar la calidad del concreto se realizan ensayos de resistencia a la compresión sobre cilindros o especímenes, conforme a lo establecido en normas como la NSR-10, la NTC 454 y la NTC 673. Estos ensayos deben complementarse con un análisis estadístico que identifique y cuantifique la variabilidad de los resultados. De este modo, el control llevado antes, durante y después de la producción permite reducir costos, optimizar recursos y garantizar que la resistencia promedio se aproxime a lo exigido por la normativa.

La evaluación estadística de la resistencia es fundamental para la seguridad y el desempeño estructural. Cuando el material no satisface las especificaciones de diseño pueden producirse fallas tempranas, sobrecostos o incluso riesgos para los usuarios. Por eso, este trabajo se apoya en normas como la NTC 2275 y la guía ACI 214R-11, que fijan procedimientos y criterios para la aplicación de métodos estadísticos en la evaluación del concreto.

En este contexto, el presente estudio desarrolla una herramienta para el control de calidad mediante análisis estadístico de la resistencia a la compresión en obras de pavimentación y urbanismo en el municipio de Itagüí. El objetivo es verificar el cumplimiento de las especificaciones de diseño. El trabajo tiene un enfoque cuantitativo: analiza muestras tomadas en distintas etapas de la obra y organiza la información con métodos estadísticos descriptivos y gráficas de control. Para ello se

emplea Excel, lo que facilita la interpretación técnica de los resultados y la formulación de recomendaciones para mejorar la colocación y la calidad del material.

2. Objetivos.

2.1 Objetivo general

- Realizar un seguimiento estadístico de los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión, con el fin de evaluar el comportamiento del concreto en la obra y garantizar el control de calidad de acuerdo con los requisitos establecidos en las normas ACI, la NSR-10 y la NTC.

2.2 Objetivos específicos

- Recolectar y organizar los datos proporcionados por la empresa relacionados con los ensayos de resistencia a la compresión y asentamiento del concreto, conforme a lo establecido en las normas NTC y la NSR-10.
- Aplicar herramientas estadísticas desarrolladas en Excel que permitan analizar los resultados de los ensayos en cilindros de concreto, con el fin de evaluar la calidad del material empleado en obra.
- Identificar posibles desviaciones o inconsistencias en los resultados de los ensayos de resistencia que puedan afectar la calidad del concreto.

3. Marco teórico.

3.1. Análisis estadístico del ensayo de resistencia a la compresión.

El concreto es uno de los materiales más usados en el mundo debido a su versatilidad, su durabilidad y su capacidad de resistir diferentes tipos de cargas. Según el American Concrete Institute (2000), *"el concreto es un material compuesto que consiste esencialmente en un medio aglutinante dentro del cual están incrustadas partículas o fragmentos de agregado; en el concreto con cemento hidráulico, el aglutinante se forma a partir de una mezcla de cemento hidráulico y agua"*. Su desempeño estructural depende de muchos factores que se manejen tanto en su producción como en su aplicación, tales como la dosificación, colocación, el correcto curado, y especialmente controlar las propiedades mecánicas, como es el caso de la resistencia a la compresión.

El seguimiento de la calidad del concreto es indispensable y fundamental para garantizar la seguridad y el correcto desempeño de este material. Por tanto, es imperativo acogerse a las diferentes normativas que regulan las condiciones y los adecuados parámetros que debe seguir el proceso de calidad del concreto. En este contexto, una de las formas más eficientes para evaluar es utilizar herramientas estadísticas que permitan analizar datos de los ensayos obtenidos en campo y en laboratorio, como las pruebas de resistencia a la compresión. Gracias al análisis estadístico se pueden determinar tendencias, variaciones, desviaciones estándar y niveles de confiabilidad luego de realizar una recopilación y una correcta organización de los datos en obra o laboratorio. Al final, los resultados permiten tomar decisiones informadas sobre si se acepta o se rechaza un lote de concreto o, en casos de mayor relevancia, determinar la calidad del material usado durante toda la obra o en la producción de este en una planta. Asimismo, permiten detectar posibles fallas en el proceso constructivo, las cuales pueden ser inducidas por la inadecuada toma de muestras, el incorrecto procedimiento al elaborar los cilindros o las malas prácticas al transportar los especímenes. Todas estas situaciones se pueden manejar siguiendo las recomendaciones de la NTC 550 de ICONTEC.

Por otra parte, al aplicar estadística en el control de calidad, permite calcular probabilidades de falla y realizar estimaciones de resistencia con base a datos dicientes. En consecuencia, utilizar la estadística no solo identifica el comportamiento del material, sino que además optimiza los procesos constructivos asegurando seguridad, calidad, economía, y durabilidad en los proyectos.

3.2. Conceptos fundamentales.

Debido a que se va realizar un minucioso estudio estadístico y aplicar diferentes cálculos, por tanto, es necesario conocer los conceptos básicos relacionados con el ensayo de resistencia a la compresión, y la correspondiente terminología sobre estadística utilizada para este caso. A continuación, se presenta las principales nociones sobre la temática propuesta anteriormente.

A partir de los conceptos basados en "ACI Concrete Terminology," se mencionan los siguientes conceptos:

- **Cilindros compañeros: "**cilindros hechos a partir de la misma muestra de concreto" (ACI, s.f.).
- **Ensayo de resistencia o resultado del ensayo de resistencia: "**promedio de las resistencias a la compresión de dos o más cilindros acompañantes ensayados a la misma edad" (ACI, s.f.).
- **Muestra de concreto: "**una porción de concreto, tomada al mismo tiempo, a partir de una sola tanda o una sola carga de camión de concreto" (ACI, s.f.).
- **Registro del ensayo: "**un conjunto de resultados de ensayos de resistencia de una misma mezcla de concreto" (ACI, s.f.).
- **Resistencia de un solo cilindro:** "También conocida como resistencia individual) es la resistencia a la compresión de un solo cilindro (ASTM C39/C39M)". La resistencia de un solo cilindro es parte de, pero individualmente no constituye el resultado de un ensayo" (ACI, s.f.).

- **Resistencia individual**: "También conocida como resistencia de un solo cilindro) es la Resistencia a la compresión de un solo cilindro (ASTM C39/C39M); la resistencia de un solo cilindro es parte de, pero individualmente no constituye el resultado de un ensayo" (ACI, s.f.).
- **Variaciones de la resistencia:** Según la *ACI 2014RS-11*, las variaciones en la resistencia de los especímenes de ensayo de concreto se pueden atribuir a dos fuentes principalmente:
  1. Variabilidad en las propiedades que influyen en la mezcla y el proceso de construcción.
  2. Variabilidad en la medición de la resistencia de los procedimientos (ACI, 2011).

  La misma guía establece un grupo de fuentes principales de variación de resistencia que se evidencia en la siguiente tabla.

Figura 1.

Fuentes principales de variaciones de la resistencia.

Variaciones entre tandas	Variaciones dentro de la tanda
Variaciones en las características y las dosificaciones de los ingredientes: • Agregados; • Materiales cementantes, incluyendo las puzolanas; y • Aditivos. *Cambios en la relación (a/mc) causados por:* • Control deficiente del agua; • Variación de la humedad de los agregados en su sitio de almacenamiento; • Variación de las mediciones de la humedad de los agregados; y • Remezclado. *Variaciones en el mezclado, transporte, y muestreo:* • Tiempo y velocidad de mezclado; • Distancia entre la planta y sitio de colocación; • Condiciones del camino; e • Incapacidad de obtener una muestra representativa de la tanda. *Variaciones en la colocación, y consolidación** • Canal, bomba, o carretilla; • Vibración interna o externa; y • Diferentes operadores. *Variaciones en la temperatura y el curado del concreto** • Estacional; • Humedad del ambiente; y • Velocidad del viento.	*Inadecuado muestreo de la muestra de la tanda.* *Variaciones debidas a las técnicas de fabricación:* • Condiciones deficientes; • Herramientas incorrectas; • Encofrados de mala calidad, dañados o distorsionados; • Colocación y consolidación deficientes; y • Manejo incorrecto de muestras de ensayo frescas. *Diferencias en el curado:* • Demoras en el inicio del curado inicial; • Variación de temperatura; • Control de humedad variable; • Curado inicial deficiente; • Demoras en el transporte de los cilindros al laboratorio; • Manejo descuidado de los cilindros durante el transporte; y • Curado final inadecuado. *Variaciones en los ensayos de las muestras:* • Operario no certificado; • Preparación de la superficie del espécimen; • Equipo de ensayo inadecuado o no calibrado; • Tasa de carga no estándar; y • Manejo deficiente de los registros.

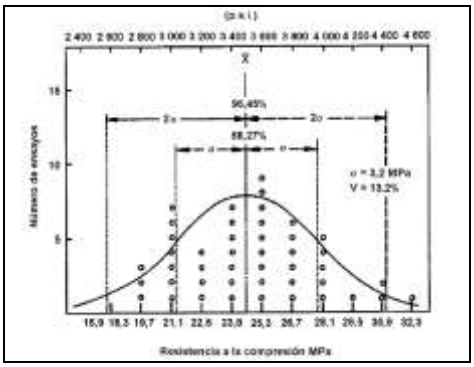
Tomado de (ACI Committee 214, 2011).

- **Distribución normal: "**una distribución natural que se presenta con frecuencia y que tiene propiedades predecibles" (ACI, s.f.). Ahora bien, según la NTC 2275, se asume que en los ensayos de resistencia a la compresión se debe asumir que el comportamiento de las resistencias

de las muestras en un obra controlada y regulada según la norma, cae dentro de un patrón que se asimila a como se agrupan los datos en una distribución normal (**Figura 2**). Esto quiere decir, que los valores de resistencia se agruparan en la media, y la curva será alta y estrecha; mientras que cuando aumentan las variaciones en los datos, la curva se ampliará y será más baja (**Figura 3.**), indicando una dispersión de datos y aumento de la desviación estándar. Esta situación puede ser indicio de inconsistencias en el muestreo o de problemas en la calidad del material ensayado.

Figura 2.

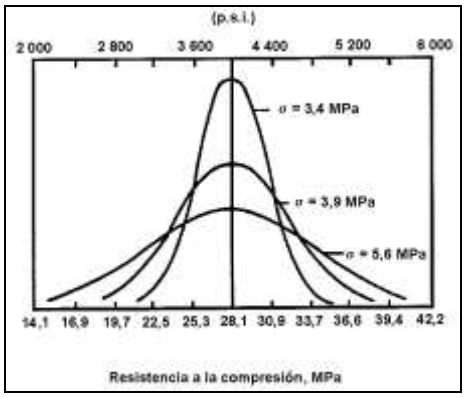
Distribución tipo normal de frecuencia de resultados de resistencia.



Fuente :(ACI Committee 214, 2011)

Figura 3.

Curvas normales de frecuencia para diferentes desviaciones estándar.



Tomado de: (ACI Committee 214, 2011)

- **Promedio X**: En el seguimiento de la obra de principio a fin, es la resistencia promedio de todos los ensayos individuales.

$$X = \frac{x_1+x_2+x_3 \ldots x_n}{n} \qquad \textbf{Ecuación 1}$$

Según la norma NTC 2275 (ICONTEC, 1997), X_1, X_2, $X_3 \ldots X_n$ son los datos de resistencia de los ensayos individuales y n es el número total de ensayos realizados. Un ensayo se define como la resistencia promedio de todos los cilindros de la misma edad elaborados de una muestra tomada de una única mezcla de concreto.

- **Desviación Estándar s:** La medida de dispersión generalmente reconocida, es la raíz cuadrada media de la desviación de las resistencias, con relación a su promedio. (INCONTEC, 1997).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum x_1^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}{n-1}} \qquad \textbf{Ecuación 2}$$

- **Coeficiente de variación, V:** La desviación estándar, expresada como un porcentaje de la resistencia promedio, se llama coeficiente de variación. (INCONTEC, 1997).

$$V = \frac{\sigma}{x} * 100 \qquad \textbf{Ecuación 3}$$

- **El rango** es la función estadística que se obtiene restando el menor de un conjunto de números del más alto del grupo. El rango dentro del ensayo se calcula restando la resistencia menor de la resistencia mayor del grupo de cilindros. (INCONTEC, 1997).

4. Metodología.

4.1. Recolección de datos.

La metodología del trabajo está basada en un enfoque cuantitativo, ya que, principalmente, se cuenta con datos que son evaluados mediante un análisis estadístico. El análisis se realiza desde una perspectiva descriptiva e inferencial, con el objetivo de obtener conclusiones técnicas que sean significativas para mejorar el control de calidad en obra.

Primeramente, se recolectaron los datos experimentales relacionados con los ensayos de los especímenes. Estos datos son proporcionados por la empresa, y corresponden a valores de resistencia a la compresión en tiempos de 7, 14, 28 días de curado, lo cuales fueron ensayados por el laboratorio encargado. Se definió el objetivo del control estadístico y se seleccionó las variables a estudiar. Luego se realizó una organización de los datos con los parámetros más importantes a tener en cuenta, como la edad de curado, las fechas de muestreo y las fechas de ensayos. También, se clasificó las resistencias según el tiempo de curado que correspondía, con el objetivo de obtener el par de ensayos de acuerdo a cada edad de curado, y así evaluarlos según los criterios contemplados en la guía ACI 214RS-11(Ver **Tabla 1**). Además, se establecieron las normas de referencia y se identificarán los puntos y las frecuencias de muestreo. De igual forma, se tuvo en cuenta el número de especímenes, el tamaño de lotes, las condiciones ensayo ya definido, y así mismo los ensayos que se realizaron cada vez que hubo vaciado de concreto en obra. A continuación, se muestran los datos agrupados para evaluar la calidad del concreto de 28 MPa usados para accesos vehiculares ensayados a los 28 días de curado.

Tabla 1.

Tabla de ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días.

No de Muestra consecutivas	CONS No.	Fecha de Toma	Fecha de Ensayo	Esfuerzo (MPa)	
			Edad (Días)	28 días	
			28	1	2
1	206	20/02/2025	20/03/2025	38.5	33.6
2	206	22/02/2025	22/03/2025	59.2	58.5
3	236	26/02/2025	26/03/2025	52.3	51.6
4	236	27/02/2025	27/03/2025	45.4	46.6
5	236	28/02/2025	28/03/2025	45	45.4
6	236	04/03/2025	01/04/2025	38	35
7	256	05/03/2025	02/04/2025	45.2	46.9
8	256	07/03/2025	04/04/2025	52.3	51
9	282	11/03/2025	08/04/2025	41.9	44.5
10	282	12/03/2025	09/04/2025	31.8	31.8
11	282	13/03/2025	10/04/2025	46.1	51.6
12	282	14/03/2025	11/04/2025	28.3	29.7
13	319	18/03/2025	15/04/2025	55.2	57.1
14	319	21/03/2025	18/04/2025	50.8	57.9
15	319	22/03/2025	19/04/2025	36.7	40.4
16	350	28/03/2025	25/04/2025	29.4	32.7
17	350	01/04/2025	29/04/2025	35.2	33.8
18	350	02/04/2025	30/04/2025	32.4	31.5
19	350	03/04/2025	01/05/2025	37.7	38.7
20	350	05/04/2025	03/05/2025	51.4	50.8
21	350	07/04/2025	05/05/2025	23.8	24.9

4.2. Limpieza de datos.

Cabe resaltar que se utilizaron herramientas e información previa, que incluye bitácoras de obra, hojas de cálculo y hojas de control estadístico que permitieron un análisis profundo. Por tanto, con estos instrumentos se procedió a una exhaustiva organización y limpieza de datos, que consiste en ordenar los valores de manera que se acomoden al modelo estadístico correspondiente, en este caso a la distribución normal, según lo establecen las recomendaciones de la NTC 2275 y la ACI 214RS-11. Además, no se tuvieron en cuenta valores atípicos o se descartaron errores que puedan afectar el análisis, los cuales en la bitácora de ensayos proporcionados por el laboratorio aparecen como N.A, y que según la declaración de conformidad corresponden a ensayos cuyos cilindros son defectuosos; esto con el fin de obtener más precisión y exactitud en el modelo. Ahora bien, esto se realizó solo si era necesario y siguiendo de forma rigurosa las especificaciones de las normas técnicas.

4.3. Cálculos estadísticos.

Posteriormente, se procedió a realizar cálculos descriptivos. Se calcularon los principales indicadores, como la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación. Primeramente, se obtuvo una resistencia promedio de cada par de especímenes para calcular los siguientes parámetros descriptivos a partir de los conceptos y criterios establecidos en la Guía ACI 214RS-11:

a) **Resistencia Promedio**: media de todos los promedios de cada par de especímenes o ensayos individuales. Se utilizó la ecuación para calcular dicha resistencia.

$$X = \frac{x_1+x_2+x_3 \dots x_n}{n} \qquad \textbf{Ecuación 1}$$

b) **Desviación estándar**: La medida de dispersión generalmente reconocida, es la raíz cuadrada media de la desviación de las resistencias, con relación a su promedio. (ACI, 2014, p. 7).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum x_1^2 - \frac{(\sum x_i)^2}{n}}{n-1}} \qquad \textbf{Ecuación 2}$$

En este paso, la desviación estándar se debe multiplicar por un factor de modificación que se presenta en la **Figura 4** (American concrete Institute, 2011, p. 18) cuando existen de 15 a 30 resultados del ensayo de resistencia, y así tomar estimaciones lo suficientemente conservadoras para tener en cuenta la incertidumbre en la desviación calculada. Esta metodología es mencionada en la ACI 318, capitulo 5; y en la guía ACI 214RS-11.

Figura 4.

Factor de modificaciones para desviación estándar.

Número de ensayos	Factor de modificaciones
Menor de 15	Consulte la Tabla 5.2
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30 ó más	1.00

*Tabla 5.3.1.2 de ACI 318.

Tomado de: (ACI Committee 214, 2011).

c) **Coeficiente de variación**: La desviación estándar, expresada como un porcentaje de la resistencia promedio.

$$V = \frac{\sigma}{x} * 100 \qquad \textbf{Ecuación 3}$$

d) **Rango**: Según la Guía ACI 214RS-11, este valor estadístico se obtiene al restar la resistencia más baja de un solo cilindro a partir de la resistencia más alta de un solo cilindro de dos o más cilindros que integran el resultado de resistencia. Luego, teniendo todos los rangos de los pares, se procede a calcular el intervalo promedio dentro de la tanda, que más adelante servirá para estimar la desviación estándar dentro de la tanda.

Es importante aclarar que se deben tomar mínimo pares de cilindros entre tandas, ya que una sola resistencia de una mezcla de concreto no proporciona suficientes datos para el análisis estadístico. Además, la guía nos comenta que es necesario por lo menos 10 resultados del ensayo de resistencia de la misma edad para tener valores confiables para el Intervalo promedio.

e) Desviación estándar dentro de la tanda: Luego de calcular el intervalo promedio, se obtiene esta desviación S_1, que corresponde a la dispersión dentro de la prueba. Se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$S_1 = \frac{1}{d_2} * \bar{R} \qquad \textbf{Ecuación 4.}$$

Donde d_2 corresponde al factor para el cálculo de la desviación estándar dentro de tanda y se obtiene a partir de los intervalos de ensayos con el uso de dos, tres y cuatros especímenes, como se muestra en la **Figura 5.**

Figura 5.

Factores para el cálculo de la desviación estándar dentro de la tanda a partir del Intervalo de ensayos.

No. de especímenes	d_2
2	1.128
3	1.693
4	2.059

Fuente: (ACI Committee 214, 2011).

En este caso se realizó el cálculo con d_2 igual 1.128, ya que solo había pares de especímenes cuyo diámetro es de 6 pulgadas.

f) Coeficiente de variación dentro de la prueba: La desviación estándar de la muestra expresada como un porcentaje de la resistencia promedio *X* se llama el coeficiente de variación. Esta expresada en la siguiente ecuación:

$$V = \frac{S}{X} * 100 \qquad \textbf{Ecuación 5}$$

Donde *V* es el coeficiente de variación, *s* es la desviación estándar de la muestra, y *X* es el promedio del resultado del ensayo de resistencia.

En este caso se realizó el cálculo con d_2 igual 1.128, ya que solo había pares de especímenes cuyo diámetro es de 6 pulgadas.

4.3. Generación de curva distribución normal.

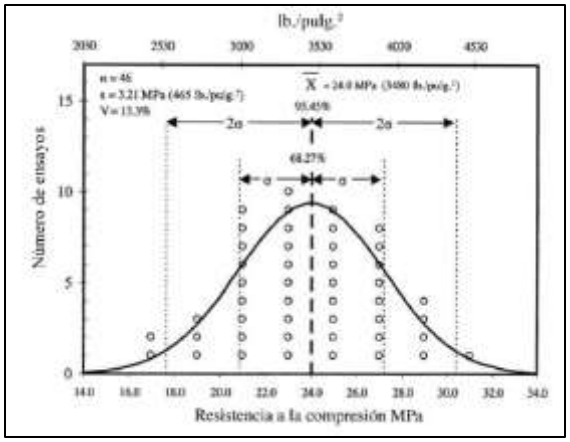
Posterior al cálculo de estos parámetros, se siguió con la generación de la gráfica de curva de distribución normal o curva de Gauss. Teniendo en cuenta los valores de resistencia promedio entre los pares (este caso), y calculando las respectivas densidades de probabilidad, con la siguiente ecuación:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-u}{\sigma}\right)^2} \qquad \textbf{Ecuación 6.}$$

Según la norma NTC 2275, afirma que existe un buen control si la mayoría de los valores están agrupados cerca de la media, y la curva se presenta alta y estrecha (ver **Figura 6.**). Además, la variación es inversamente proporcional a la distribución de los valores con respecto a la ubicación de la curva, es decir, conforme va aumentando la variación, los valores se van alejan y crean dispersión, provocando que la curva sea baja y alargada. Cabe resaltar que el 68% del área (equivalente al 68 % de los resultados de los ensayos) caen dentro de ± 1 s del promedio, 95 % dentro de ± 2 s dentro de un comportamiento de distribución normal estándar.

Figura 6.

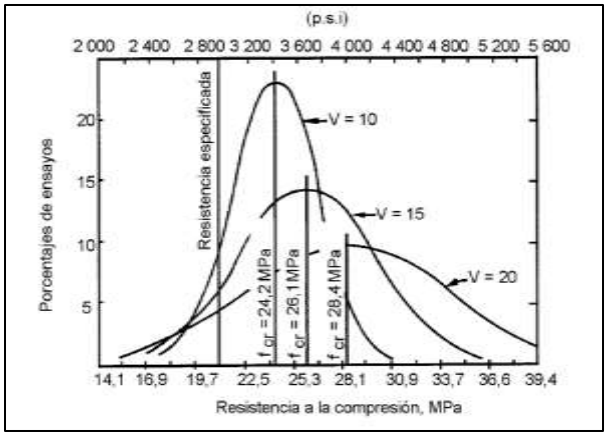
Distribución de frecuencia de los datos de resistencia y su correspondiente distribución normal supuesta.



Fuente: (ACI Committee 214, 2011).

Figura 7.

Curvas de frecuencia normal de tres distribuciones diferentes con la misma media pero con variabilidad diferente.



Fuente: (ACI Committee 214, 2011).

Ahora bien si se observa en la **Figura 7.** se demuestra que, al aumentar las variaciones, también aumenta el f´cr, la resistencia promedio requerido para mezcla, y con esto confirma que debe haber un buen control, desde el punto de vista económico según lo expresado en la Norma NTC 2275. Se calcula la resistencia promedio requerida, la cual es uno de los principales indicadores y esta expresada en la siguiente ecuación:

$$fcr = f´c + t\sigma \qquad \textbf{Ecuación 7}$$

Según La NTC 2275:

f'cr = Resistencia promedio requerida para la mezcla.

f'c = Resistencia especificada de diseño.

t = Constante que depende de la proporción de ensayos que pueden caer debajo de f'c (Véase la Tabla 5).

V = Valor pre-estimado del coeficiente de variación, expresado como una fracción.

s = Valor de la desviación estándar pre-estimada.

Nota: Es importante tener en cuenta los criterios para el requisito de resistencia que serán explicados más adelante para poder realizar estimaciones más precisas dependiendo del caso a estudiar.

Luego de obtener el grafico de distribución normal se verifica con la prueba de Kolmogorov-Smirnov si el comportamiento de las resistencias sigue una distribución normal, y así también se valida el uso de métodos estadísticos para el concreto según la ACI 214RS-11 y la NTC 2275.

4.4. Evaluación de control de calidad.

Seguidamente, se tuvo en cuenta información relativa a las normas de control de calidad, donde se tuvo presente las tablas relacionadas con los estándares de control del concreto para *fc'* menores de 35 MPa, ya que las resistencias de diseño a evaluar son de 21 MPa para andenes y 28 MPa para acceso vehiculares. Dichas normas se muestran en la **Figura 8.** mediante el método de desviación estándar en la variación general o los valores de la
Figura 9. si se obtienen a partir del método de coeficiente de variación dentro de la tanda, como lo indica la guía ACI 214RS-11, para determinar el criterio de aceptación.

Figura 8.

Normas de control a partir de método de la desviación estándar.

Variación total					
Clase de operación	Desviación estándar para diferentes clases de control, MPa (p.s.i)				
	excelente	muy bueno	bueno	aceptable	pobre
Ensayo de construcciones en general	por debajo de 2,5 (357)	de 2,5 a 3,5 (357 a 500)	de 3,5 a 4,0 (500 a 571)	de 4,0 a 5,0 (571 a 714)	sobre 5,0 (714)
Mezclas de ensayos de laboratorio	por debajo de 1,5 (214)	de 1,5 a 1,7 (214 a 243)	de 1,7 a 2,0 (243 a 286)	de 2,0 a 2,5 (286 a 357)	sobre 2,5 (357)

Fuente: (INCONTEC, 1997)

Figura 9.

Normas de control a partir del método del coeficiente de variación dentro del ensayo.

Variación dentro del ensayo					
Clase de operación	Coeficiente de variación para diferentes clases de control, en %				
	excelente	muy bueno	bueno	aceptable	pobre
Ensayo de control en el campo	por debajo de 3,0	de 3,0 a 4,0	de 4,0 a 5,0	de 5,0 a 6,0	por encima de 6,0
Mezclas de ensayos de laboratorio	por debajo de 2,0	de 2,0 a 3,0	de 3,0 a 4,0	de 4,0 a 5,0	por encima de 5,0

Fuente: (INCONTEC, 1997)

Asimismo, se calcula una resistencia promedio mínima requerida por la ACI 318, que debe cumplir los criterios que aseguran el desempeño de un concreto. Dicha resistencia, luego se asegura que la

resistencia promedio requerida *fcr'* sea igual o mayor a la resistencia especificada *fc'* por un múltiplo, escogido para representar el porcentaje de ensayos que se permiten que sean defectuosos.

Estos criterios se basan en lo establecido por la ACI 318 y también se encuentran en la guía ACI 214RS-11, por lo cual se tomaron los valores de la tabla 5.3 de esta guía (American Concrete Institute, 2011, p. 15), según las resistencias alcanzadas y el número de datos disponibles, con el fin de seleccionar las fórmulas basadas en el coeficiente de variación y en la desviación estándar, y así determinar el promedio mínimo requerido. Por tanto, para realizar el cálculo se eligió las ecuaciones basadas en la desviación estándar (5-2b) y la (5-3b) de la tabla 5.3, que corresponden a los criterios 2 y 3 respectivamente como se evidencia en la **Figura 10**..

Figura 10.

Ecuaciones para determinar el promedio mínimo requerido según criterios.

	Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3*	Criterio 4†
	Porcentaje máximo de ensayos individuales < f_c'	Porcentaje máximo de promedio móvil de n ensayos consecutivos < f_c'	Porcentaje máximo de ensayos individuales < ($f_c' - k$)	Porcentaje máximo de ensayos individuales < (k% de f_c')
Fórmula basada en el coeficiente de variación Ecuación número	$f_{cr}' = f_c'/(1 - zV)$ (5-1a)	$f_{cr}' = f_c'/(1 - zV/\sqrt{n})$ (5-2a)	$f_{cr}' = (f_c' - k)/(1 - zV)$ (5-3a)	$f_{cr}' = k f_c'/(1 - zV)$ (5-4a)
Fórmula basada en la deviación estándar Ec. número	$f_{cr}' = f_c' + zs$ (5-1b)	$f_{cr}' = f_c' + (zs/\sqrt{n})$ (5-2b)	$f_{cr}' = (f_c' - k) + zs$ (5-3b)	$f_{cr}' = kf_c' + zs$ (5-4b)

Fuente: (ACI Committee 214, 2011).

Como se mencionó anteriormente, se calculó mediante la fórmula basada en la desviación estándar (5.2b) y (5 – 3b) de la **Figura 10**., y no se requirió utilizar el criterio 1, ya que la ecuación del tercer criterio es una modificación del primero, donde el ingeniero tiene en cuenta una cierta probabilidad de que un resultado de ensayo individual de resistencia aleatorio no esté una cierta cantidad por debajo de *fc´*, por tanto se usa, el criterio N° 3 de ACI 318, al estipular que ningún resultado de ensayo individual caiga por debajo de *fc´* en más de 3.5 y su probabilidad de ocurrencia debe ser 1 en 100, por tanto *k* se le atribuye el valor de 3.5 en la ecuación (5 – 3b). En cuanto al

valor z que es la probabilidad requerida o nivel de confiabilidad, se tomó un valor de 1%, que corresponde al valor de z = 2.33 según la **Figura 11.** en los criterios 2 y 3, solicitada en la norma americana ACI 318 y en El Código Colombiano de Construcciones Sismo-resistentes.

Figura 11.

Probabilidad asociada con valores de z.

Porcentajes de ensayos dentro de ± zσ	Oportunidades de caer por debajo de $f_c' - z\sigma$	z
40	3 en 10 (30%)	0.52
50	2.5 en 10 (25%)	0.67
60	2 en 10 (20%)	0.84
68.27	1 en 6.3 (15.9%)	1.00
70	1.5 en 10 (15%)	1.04
80*	1 en 10 (10%)	1.28*
90	1 en 20 (5%)	1.65
95	1 en 40 (2.5%)	1.96
95.45	1 en 44 (2.3%)	2.00
98*	1 en 100 (1%)	2.33*
99	1 en 200 (0.5%)	2.58
99.73	1 in 741 (0.13%)	3.00

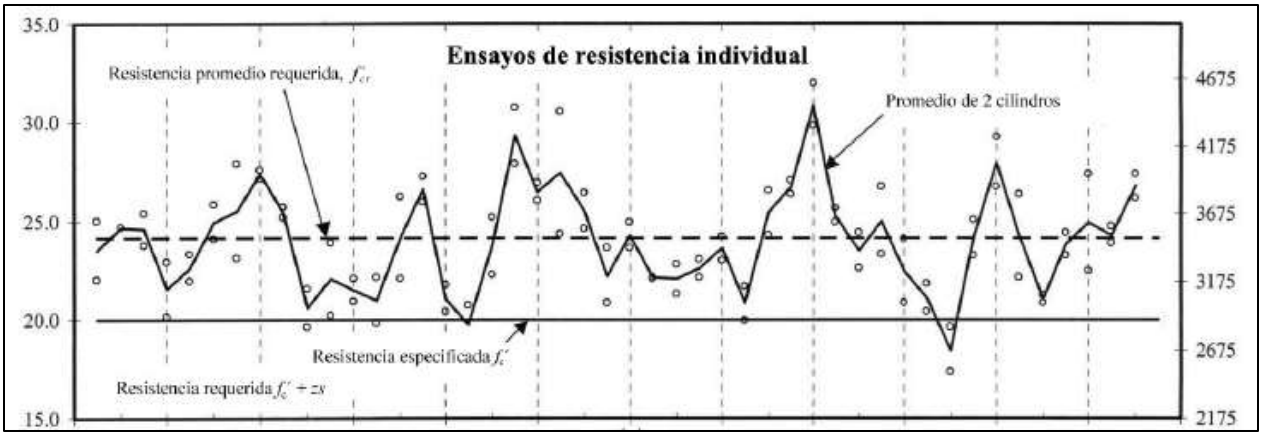
Fuente: (ACI Committee 214, 2011).

Nota: El cuarto criterio no se desarrolló porque corresponde a valores fc´ superiores a 35 Mpa.

Inmediatamente, se sigue con la generación de gráficas de control por variables o llamadas cartas de control, mediante las herramientas de Excel, con el fin de visualizar el comportamiento del proceso de forma más amplia, clara y precisa. En primera parte, se realizó una gráfica de resistencia simple(ver **Figura 12.**), y para generar esta carta se necesitó realizar el seguimiento de todas las resistencia promedio de los ensayos individuales a 28 días de curado, graficados en sucesión a fecha de vaciado, donde se muestra la variación entre un par de cilindros hechos de la misma muestra de concreto, y además se tiene en cuenta la resistencia mínima *fcr'* requerida (ya calculada con los criterios escogidos para resistencias individuales), y la inclusión de la resistencia especifica como línea límite.

Figura 12.

Carta de control, Ensayos de resistencia individual.

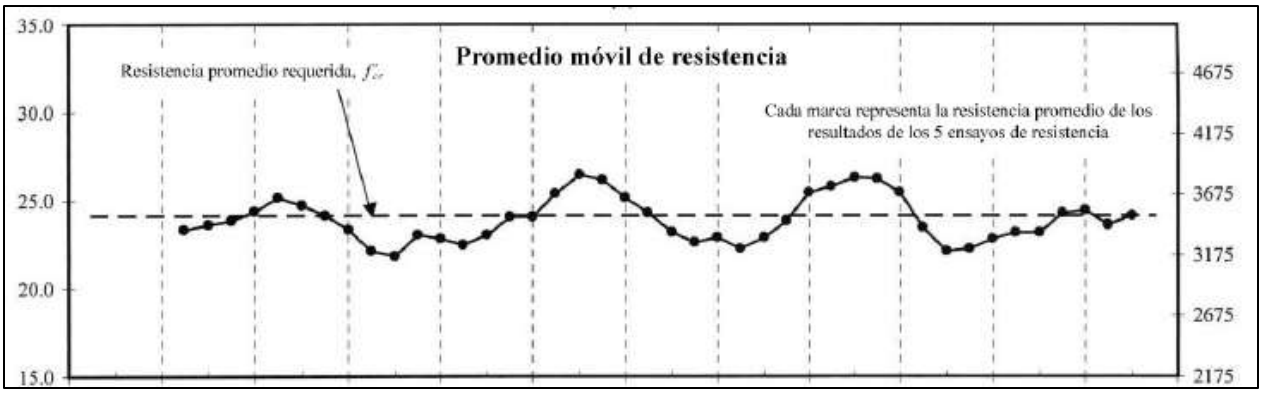


Fuente: (ACI Committee 214, 2011).

Posteriormente, se realizó una gráfica llamada Desplazamiento de la resistencia promedio (ver **Figura 13**), que según la guía ACI 214, muestra el promedio móvil de resistencia de ensayos consecutivos. Con esta grafica se identifican con facilidad las tendencias y las influencias de los efectos, como los cambios de materiales, con mayor efectividad. También incluye la resistencia especificada en las cartas de control. Las siguientes graficas obtenidas de las guías ACI 214RS-11 muestran un esquema de cómo debe ser planteados los criterios.

Figura 13.

Carta de control, promedio móvil de ensayos consecutivos.



Fuente: (ACI Committee 214, 2011).

Con base en el análisis descriptivo, las gráficas de control y el estudio inferencial, se evalúa si el modelo cumple con los requerimientos establecidos en las normas para aceptación, y se define, de igual forma, si el proceso está bajo control estadístico. Por tanto, se identifican patrones, tendencias, variaciones o desviaciones que indiquen claridad o sean dicientes para determinar conclusiones sobre si el modelo es estable o está fuera de control.

5. Análisis de resultados.

5.1 Análisis de criterios de resistencia.

Luego de organizar los datos por pares de cilindros correspondientes a sus edades y filtrar la información para obtener el grupo 21 de especímenes a la edad de 28 días como se muestra en la **Tabla 1**, que se realizaron en Itagüí, desde el mes de febrero hasta el mes de mayo, se obtuvieron los siguientes resultados (ver **Tabla 2**). Se debe tener en cuenta que solo se analizó los resultados de los ensayos de resistencia específica de diseño de 28 MPa para accesos vehiculares con alta carga. De igual forma, estos datos funcionan para hacer un análisis correcto del control de calidad, ya que 21 resultados promedio es muestra aceptable para hacer una evaluación estadística según la ACI- 214 y la NTC 2275, donde establecen que un mínimo de 30 resultados es lo ideal para un análisis estadístico confiable, pero con 15 o más datos se puede aplicar los criterios como aceptables.

A continuación, en la **Tabla 2** se muestran los datos de los pares de resistencias recopilados a los 28 días como se mencionó anteriormente. Se evidencia resultados como el rango, resistencia promedio, el cumplimiento de resistencia individual (fc´ - 3.5 MPa), la resistencia promedio (promedio consecutivo de tres muestras) y el cumplimiento de este promedio móvil al ser mayor a la resistencia especifica teniendo en cuenta un margen de que el 10% de los ensayos se le permite caer por debajo de fc´ según la ACI-318 y la norma colombiana NTC 3318.

Tabla 2

Tabla de resistencias promedios individuales y cumplimiento.

No de Muestra consecutivas	Cilindro No.	Esfuerzo (MPa) 28 días 1	2	Rango R	Resistencia Promedio (Mpa) 28 días	Resistencia Especificada F¨c (MPa)	Cumplimento (F´c - 3,5 MPa) individuales (	Promedio Móvil de Resistencia	Cumplimento 1% de 03 pruebas consecutivas
1	65	38.5	33.6	4.9	36.05	28	Cumple		
2	77	59.2	58.5	0.7	58.85	28	Cumple		
3	83	52.3	51.6	0.7	51.95	28	Cumple	49.0	Cumple
4	89	45.4	46.6	1.2	46.00	28	Cumple	52.3	Cumple
5	95	45	45.4	0.4	45.20	28	Cumple	47.7	Cumple
6	101	38	35	3.0	36.50	28	Cumple	42.6	Cumple
7	107	45.2	46.9	1.7	46.05	28	Cumple	42.6	Cumple
8	113	52.3	51	1.3	51.65	28	Cumple	44.7	Cumple
9	119	41.9	44.5	2.6	43.20	28	Cumple	47.0	Cumple
10	125	31.8	31.8	0.0	31.80	28	Cumple	42.2	Cumple
11	131	46.1	51.6	5.5	48.85	28	Cumple	41.3	Cumple
12	137	28.3	29.7	1.4	29.00	28	Cumple	36.6	Cumple
13	143	55.2	57.1	1.9	56.15	28	Cumple	44.7	Cumple
14	149	50.8	57.9	7.1	54.35	28	Cumple	46.5	Cumple
15	155	36.7	40.4	3.7	38.55	28	Cumple	49.7	Cumple
16	167	29.4	32.7	3.3	31.05	28	Cumple	41.3	Cumple
17	173	35.2	33.8	1.4	34.50	28	Cumple	34.7	Cumple
18	179	32.4	31.5	0.9	31.95	28	Cumple	32.5	Cumple
19	185	37.7	38.7	1.0	38.20	28	Cumple	34.9	Cumple
20	191	51.4	50.8	0.6	51.10	28	Cumple	40.4	Cumple
21	197	23.8	24.9	1.1	24.35	28	No Cumple	37.9	Cumple

En la **Tabla 2** se muestra que, considerando el margen de reducción de 3,5 MPa a la resistencia especifica establecido por normativa, la resistencia promedio supera dicha resistencia en la mayoría de los casos, con excepción de un único resultado que no cumple, ya que se encuentra por debajo del valor permitido al margen. Esto indica que más del 95 % de los resultados cumplen con el criterio de resistencia según la ACI- 318 y la guía ACI 214.

5.2. Análisis estadístico de la resistencia a la compresión.

Luego, realizando los cálculos de los parámetros estadísticos se obtuvieron los siguientes resultados presentes en la siguiente tabla:

Tabla 3

Análisis Estadístico de la resistencia a la compresión según ACI 214RS-11.

Análisis estadístico de la resistencia a la compresión (ACI 214RS-11)	
Datos de la muestra	
Concreto obtenido en obra/realizado en Laboratorio:	Laboratorio
Total Muestra:	21
Factor multiplicador para Desviación Estándar:	1.07
Nro. de especímenes de ensayo a 28 días:	2.0
Cálculo de desviación estándar y coeficiente de variación	
Promedio X (MPa):	42.2
Desviación Estándar *s:*	10.56
Coeficiente de Variación *V:*	25.05
Criterio de resistencia promedio requerida *f´cr*	
Resistencia especificada f´c (MPa)	28

Resistencia promedio requerida 1% de Probabilidad f´cr = f´c + zs / √n (MPa)	42.2
Resistencia promedio requerida 1% de Probabilidad cuando (f´c - 3,5 Mpa), f´cr = (f´c -k) + zs (MPa)	49.1
Cálculos con respecto al rango promedio de la prueba	
Rango Promedio *R* (MPa)	2.1
Factor d_2	1.128
Desviación Estándar dentro de la prueba S_1	**1.87**
Coeficiente de variación dentro de la prueba V_1	**4.4**
Criterio de aceptación para concretos f´c ≤ 35 MPa	
A través de la desviación estándar.	Mala
A través del coeficiente de Variación de la prueba.	Regular
El concreto Laboratorio es de una Calidad Mala a Regular de acuerdo a la Norma NTC 2275	

* Resultados obtenidos para el concreto de 28 MPa.

Se observa que la resistencia promedio requerida es de 42.2 MPa, la cual corresponde al promedio móvil de un número específico de ensayos consecutivos, contemplado en el criterio 2 de la guía ACI 214RS y la NTC 2275, mediante el método basado en la desviación estándar. Por otro lado, la resistencia promedio requerida que considera el margen del 1% de incumplimiento en ensayos individuales **es** de 49.1 MPa**,** valor que corresponde al promedio de ensayos individuales**,** calculado según el criterio 3 mediante el mismo método de desviación estándar. Ahora bien, en la primera resistencia requerida de 42.2 MPa debe ser mayor a la resistencia especificada fc´ , en este caso de 28 MPa; y la resistencia requerida representada por promedio móvil, con valor de 49.1 MPa debe ser mayor a (fc´- 3,5 MPa), también de 28 MPa. Ambos resultados cumplen con los requisitos de resistencia.

En cuanto a la desviación estándar general se presenta con un valor de 10.56 MPa, es decir, los resultados individuales se alejan de la media que representa 42.2 MPa a este rango especifico, lo que evidencia una alta variabilidad de los datos, ya que según la ACI 214RS-11, la desviación

estándar típica debe estar entre 2 a 5 MPa, dependiendo del control de calidad. Ahora bien, este dato demuestra que en el control de calidad en la producción de concreto o la manipulación en obra no es consistente, ya que se están obteniendo resistencias muy dispersas, que van desde valores mínimos como 24.4 MPa a máximos como 58 MPa; y aunque el promedio de resistencia (42.2 MPa) es muy alto, esta dispersión puede provocar que algunos cilindros no alcancen la resistencia de diseño o especifica deseada, en este caso de 28 MPa. Por otro lado, si se habla de la desviación estándar dentro de la prueba, la situación es diferente ya que su valor representa según la **Tabla 3**, 1.87 MPa, y esto demuestra que los ensayos en el laboratorio se pueden considerar confiables.

Por otro lado, el coeficiente de variación general se observa con un valor de 25.05% como se muestra en la **Tabla 3** , valor que indica una alta variabilidad, confirmando lo dicho anteriormente con la desviación estándar, pues el coeficiente deriva de la desviación estándar. Por tanto, se interpreta que con un porcentaje tan alto, muy superior al permitido por la Normas ACI 214RS-11 y la NRC 2275, siendo el límite de 6% para fc´ ≤ 35 MPa, se presenta mucha dispersión de los resultados y no hay tendencia clara que los valores en se acumulen en la media, es decir, no hay uniformidad en la mezcla o en los procesos de la obra. Sin embargo, el coeficiente dentro de la prueba reafirma con un valor de 4.4% que el proceso de ensayos en el laboratorio no es problema, calificando el control como Regular según las normativas colombiana y americana.

Tabla 4.

Criterio de aceptación para concretos $f'_c \leq 35$ MPa.

Criterio de Aceptación para concretos $f'_c \leq 35$ MPa	
A través Método de la desviación estándar.	**Mala**
A través del Método de coeficiente de Variación de la prueba.	**Regular**
El concreto Laboratorio es de una Calidad Mala a Regular de acuerdo a la Norma NTC 2275	

*Resultados obtenidos para el concreto de 28 MPa.

La calificación según la Norma colombiana NTC 2275 y la norma americana ACI 214RS-11, después de realizar los cálculos de los parámetros estadísticos de desviación estándar general y la la variación de la prueba es de calidad **Mala a Regular** como se muestra en la **Tabla *4.***, respectivamente. Esto se debe a que bajo el criterio de aceptación para concretos fc´≤ 35 MPa, y mediante el método de la desviación estándar, el control de calidad es malo si la desviación estándar general está por encima de 4.8 (según ACI 214); y mediante el coeficiente de variación dentro de la prueba, es aceptable si el valor se encuentra entre el rango de 4.0% a 5.0% como se observa en la siguiente tabla:

Figura 14.

Estándares de control del concreto para fc´≤ 35 MPa.

Tabla 4.3—Estándares de control del concreto para $f_c' \leq 35$ MPa (5000 lb./pulg.²)

Variación general					
Clase de operación	Desviación estándar de diferentes estándares de control, MPa (lb./pulg.²)				
	Excelente	Muy buena	Buena	Regular	Mala
Ensayos generales de construcción	Por debajo de 400 (por debajo de 2.8)	400 a 500 (2.8 a 3.4)	500 a 600 (3.4 a 4.1)	600 a 700 (4.1 a 4.8)	Por encima de 700 (por encima de 4.8)
Tandas de ensayo en laboratorio	Por debajo de 200 (por debajo de 1.4)	200 a 250 (1.4 a 1.7)	250 a 300 (1.7 a 2.1)	300 a 350 (2.1 a 2.4)	Por encima de 350 (por encima de 2.4)
Variación dentro de la tanda					
Clase de operación	Coeficiente de variación de diferentes estándares de control, %				
	Excelente	Muy buena	Buena	Regular	Mala
Ensayos de control en obra	Por debajo de 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	5.0 a 6.0	Por encima de 6.0
Tandas de ensayo en laboratorio	Por debajo de 2.0	2.0 a 3.0	3.0 a 4.0	4.0 a 5.0	Por encima de 5.0

Fuente: (ACI Committee 214, 2011).

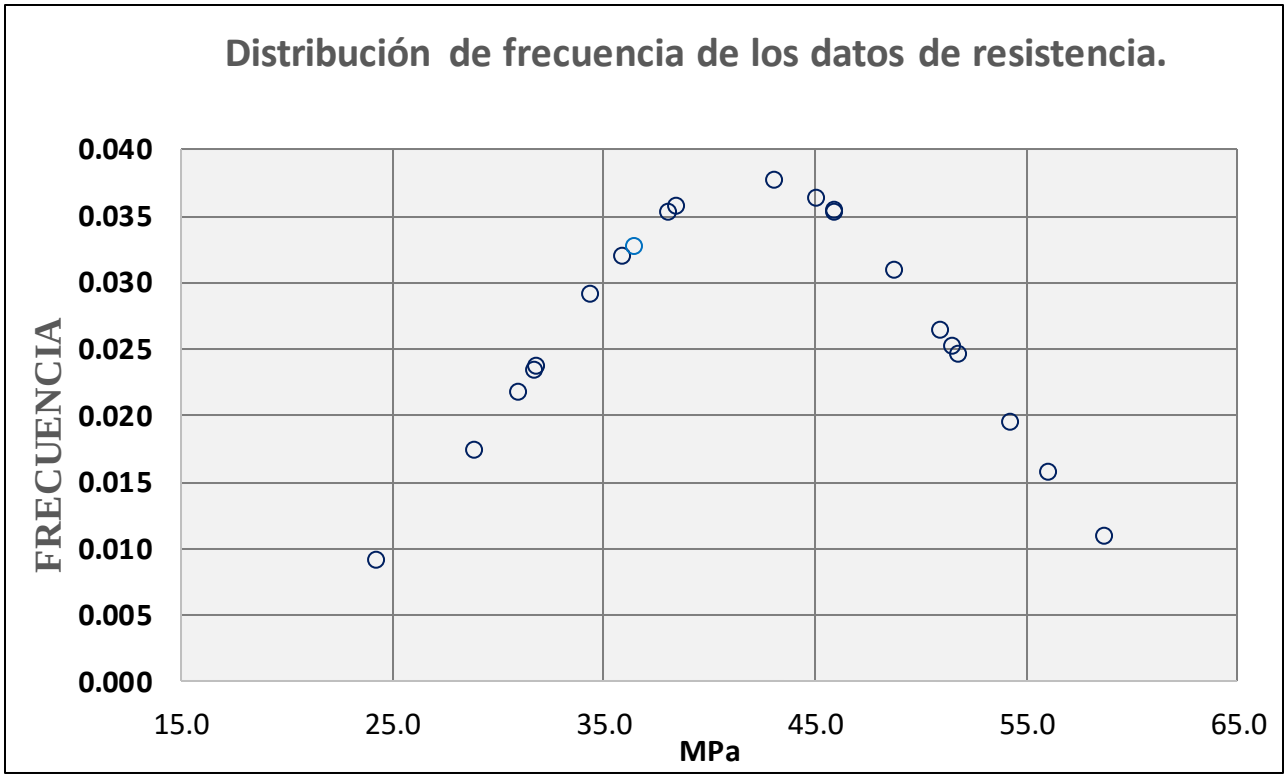
Al final, esto refleja en pocas palabras que aunque el promedio de resistencia supera a la resistencia de promedio requerida, se observan comportamientos atípicos de variación que son confirmados por el alto porcentaje del coeficiente de variación general, y que evidencia que no existe un control adecuado en cualquiera de los procesos de producción, elaboración , dosificación o colocación del concreto; pero que en los ensayos de laboratorio se presenta una variabilidad interna medianamente aceptable.

5.3. Generación de curvas de distribución de resistencia.

A continuación se presenta la tabla de distribución normal o campana de gauss, que organiza los 21 valores de resistencia a la compresión a 28 días de curado, en forma de distribución de frecuencias. Esto permite evaluar si los datos del concreto siguen el comportamiento esperado por la estadística.

Figura 15.

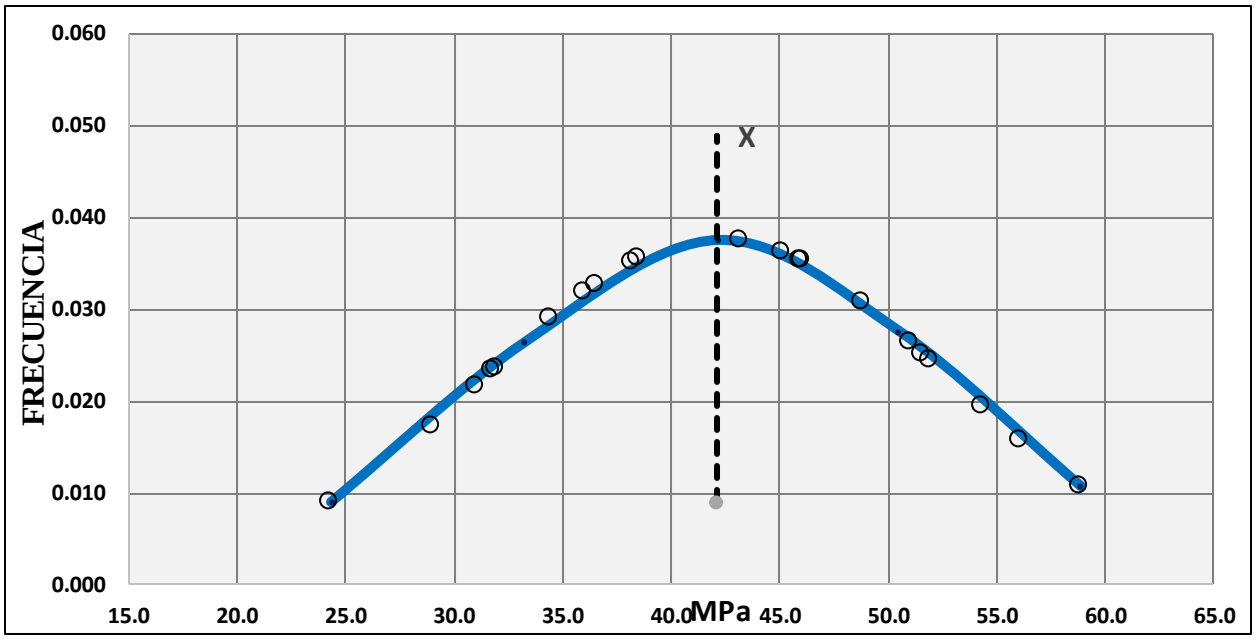
Distribución de frecuencias de los resultados de promedios de resistencia.



*21 resultados de resistencia promedios después de ser filtrado y organizados.

Figura 16.

Gráfica de campana de gauss ajustada a los resultados promedios de resistencia.



*Resultados que se ajustan a la curva de distribución teórica.

Tabla 5.

Análisis estadístico de curva de distribución normal.

CURTOSIS	-1.1
ASIMETRIA	0.0
FRECUENCIA TOTAL	21
PROMEDIO	42.2
DESVIACION	10.56
MAX DIFERENCIAL	0.110
P-KS	0.297
TEST K-S(P-KS > MAX)	SE ACEPTA DIST NORMAL

Como se había obtenido anteriormente en el cálculo de parámetros descriptivo, el promedio de los ensayos corresponde a 42.2 MPa, la desviación estándar calculada es de 10.56MPa, lo cual ensancha la curva. Se observa también que la mayoría de datos se encuentran entre 35 y 50 MPa, lo cual corresponde al rango central de la curva normal.

Se calcula una curtosis de -1.1, es decir, una curva normal platicúrtica, presenta una curva más aplanada que la normal, y esto se debe a que los datos están más alejados y menos concentrado de

la media, lo que se asocia con la alta variabilidad que representa el coeficiente de variación con un 25%. Por otra parte, la curva se mantiene simétrica, lo que indica que los resultados están equilibrados alrededor de la media (42.2 MPa) y no se observa tendencia marcada a que los resultados se acumulen más hacia los valores altos o bajos.

A continuación, se evidencia la **Tabla 6**, donde se muestran los datos acumulados en distribución normal para la realización de la prueba de Kolmogórov-Smirnov, cuyo test confirma si el comportamiento de los resultados sigue una tendencia de distribución normal. Para confirmar dicho hipótesis, el P-KS mostrado en la **Tabla 5.**, debe ser mayor o igual al máximo valor obtenido a partir de la diferencia entre los valores de distribución acumulada y Sn(x) (frecuencia teórica).
La prueba válida que los datos cumplen con el modelo de distribución normal, al verificar que P-KS que equivale a 0,297 es mayor a Máximo diferencial (0,110).

Tabla 6

Prueba de Kolmogorov- Smirnov.

PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV						
RESISTENCIA ORDENADA	DENSIDAD	ACUMULADA	Sn(x)	z	DISTRIBUCION	DIFERENCIAL
24.4	0.0320	1	0.048	-1.69	0.046	0.00174
29.0	0.0108	2	0.095	-1.25	0.106	0.01117
31.1	0.0246	3	0.143	-1.05	0.146	0.00360
31.8	0.0354	4	0.190	-0.98	0.163	0.02712
32.0	0.0362	5	0.238	-0.97	0.167	0.07121
34.5	0.0327	6	0.286	-0.73	0.234	0.05151
36.1	0.0353	7	0.333	-0.58	0.282	0.05180
36.5	0.0252	8	0.381	-0.54	0.296	0.08486
38.2	0.0376	9	0.429	-0.37	0.354	0.07463
38.6	0.0234	10	0.476	-0.34	0.366	0.10985
43.2	0.0309	11	0.524	0.10	0.539	0.01552
45.2	0.0174	12	0.571	0.29	0.613	0.04195
46.0	0.0157	13	0.619	0.36	0.642	0.02298

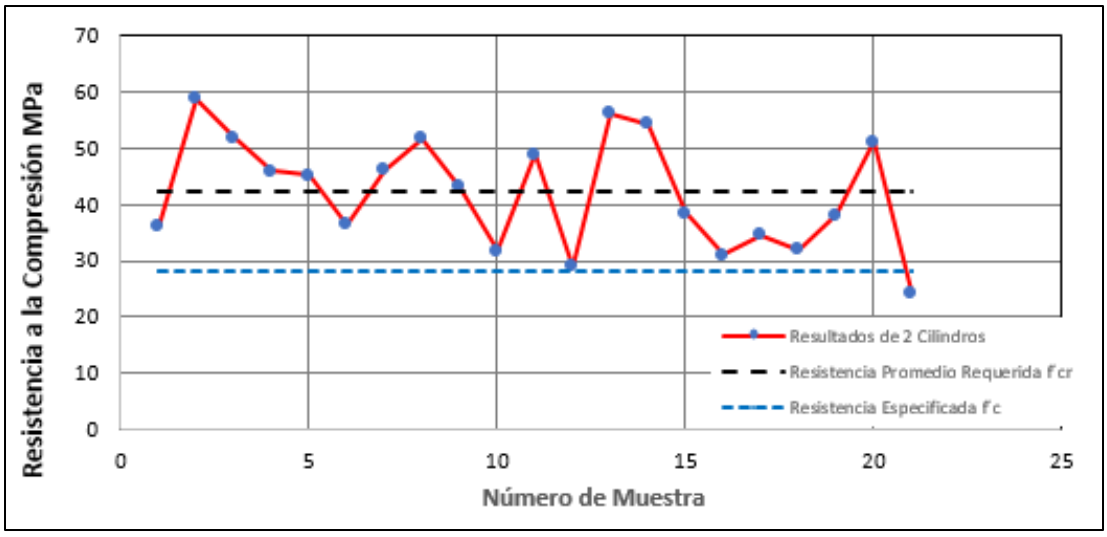
46.1	0.0194	14	0.667	0.37	0.644	0.02287
48.9	0.0356	15	0.714	0.63	0.737	0.02260
51.1	0.0217	16	0.762	0.85	0.801	0.03955
51.7	0.0290	17	0.810	0.90	0.816	0.00612
52.0	0.0237	18	0.857	0.93	0.823	0.03403
54.4	0.0352	19	0.905	1.15	0.876	0.02890
56.2	0.0264	20	0.952	1.33	0.907	0.04496
58.9	0.0091	21	1.000	1.58	0.943	0.05698

5.4. Cartas para el control de calidad para el concreto.

A continuación se muestran las cartas de control de calidad que se usan para seguir la tendencia de los resultados de resistencia, y así monitorear y evaluar la variabilidad de un proceso a lo largo del tiempo. En este caso permiten representar los resultados de resistencia a la compresión y compararlos con los límites de aceptación contemplados en la ACI 214RS-11 y la NTC 2275.

Figura 17.

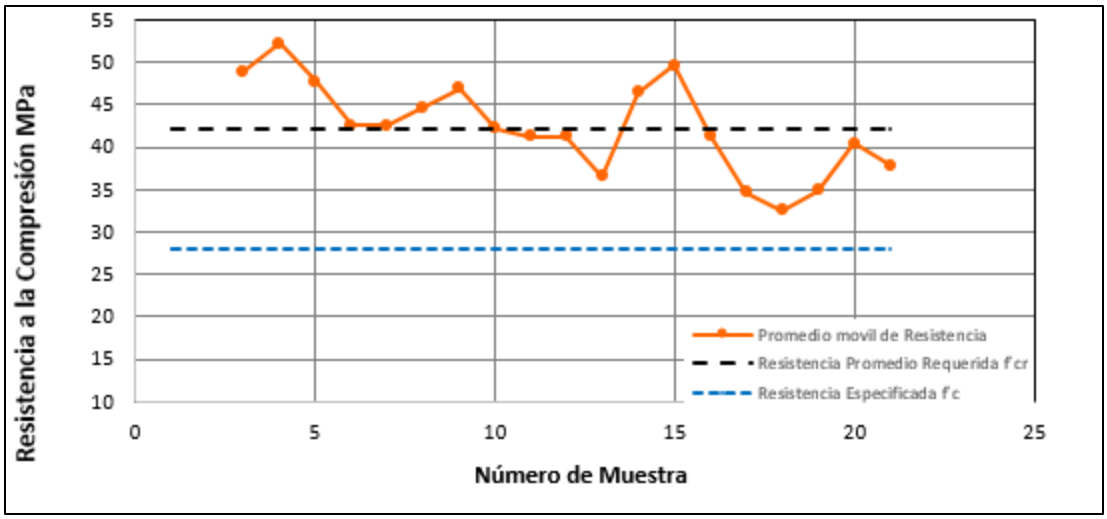
Gráfica de resistencia simple.



En la **Figura 17.**, se muestran los resultados de todos los 21 ensayos de resistencia individuales, los cuales se graficaron en sucesión en base de fecha de vaciado, mostrando la variación entre un par de cilindros hechos de la misma muestra de concreto. En la **Figura 17.**, se evidencia que existe una alta dispersión entre los valores que varían entre 25 MPa y 60 MPa. También se observa que la mayoría de los resultados superan la resistencia específica de 28 MPa, a excepción de un solo resultado, esto indica que el concreto cumple con el requisito de resistencia. Ahora bien, la tendencia muestra un patrón estable o constante, se presenta diferentes fluctuaciones que van aumentando el número de muestras, lo cual puede indicar una falta de uniformidad en los procesos de producción, y además las diferencias entre los valores más altos y los datos más bajos es muy amplia (casi 35 MPa de rango), lo cual es índice que coincide con el alto porcentaje de variación (25%) anteriormente mencionado.

Figura 18.

Gráfica de promedio móvil.



En la **Figura 18.**, se muestran los datos de promedio móvil de resistencia que representan una tendencia más profunda sobre el seguimiento de la resistencia del concreto a lo largo del tiempo. Se evidencia que ningún promedio consecutivo cae por debajo de la resistencia especificada y los datos están muy cercanos a la media (42,2) cumpliendo con el criterio de diseño, ni caen por debajo del margen permitido (fc´- 3,5 MPa), lo cual indica un buen desempeño a la resistencia. Aunque

los valores fluctúan entre 35Mpa y 50 MPa, lo cual representa una variabilidad en los resultados individuales, al tener en cuenta el promedio en conjunto de tres resultados se observa que las fluctuaciones se suavizan. La curva no muestra caídas sostenidas de ascenso, lo cual puede expresar que no hubo cambios significativos en el proceso durante el periodo evaluado. Ahora bien, el promedio móvil puede indicar que el proceso evaluado para las mezclas con resistencia especificada de 28MPa se mantiene en control estadístico en cuanto al criterio de resistencia se refiere. Por otro lado, aunque haya resultados individuales que mostraron incumplimiento, no son datos discentes para determinar el criterio de resistencia, ya que al evaluarlos en grupos se observa que la resistencia se sostiene y cae dentro de los niveles permitidos por norma, lo que quiere decir, que los valores bajos o atípicos representan datos puntuales que se pueden considerarse como una falla generalizada en la prueba y solos no determinan la calidad del proceso, pero se deben tener en cuenta para que no vuelvan a ocurrir.

6. Conclusiones.

Después de obtener todos los parámetros y de haber interpretado todas las condiciones requeridas según las normativas que representan el proceso de seguimiento estadístico para el control de los ensayos de resistencia a la compresión para las mezclas de concreto con resistencia especificada de 28 MPa que fueron vaciadas para accesos vehiculares se dedujo lo siguiente:

Primeramente, se concluye que realizando el análisis para 21 resultados de resistencia y después de haber realizado la prueba de Kolmogorov- Smirnov se considera que los resultados de resistencias se acomodan a la distribución normal y que cumplen con la aceptación para poder realizar un control estadístico confiable. Según los cálculos estadísticos realizados, la mayoría de resultados se agrupan a la media (42.2 MPa), pero con un dispersión de 10.56, con un coeficiente de variación de 25.05, y además una curtosis negativa (-1.1), lo cual indica claramente una alta variabilidad de los datos y una distribución más aplanada. Esto refleja una deficiencia en la uniformidad de producción del concreto, lo cual se hace necesario mejorar el control de calidad en los procesos de producción y colocación del concreto para así optimizar el recurso y garantizar mejores resultados.

Por otro lado, según los criterios de ACI-318 contemplados en la guía ACI 214, que se refieren al cumplimiento de resistencia de las mezclas, se puede deducir que el 95% de los ensayos de concretos individuales tuvieron una aceptación de acuerdo al normativa, incluso teniendo en cuenta el margen de reducción de 3,5MPa sobre la resistencia especificada. Esto quiere decir, en pocas palabras que la producción de concreto garantiza la resistencia especificada. De igual manera ocurre con la resistencia promedio requerida calculada a partir del promedio móvil de ensayos consecutivos y en base en la desviación resulta muy superior a la resistencia especificado de $fc´ = 28$ MPa, lo cual reconfirma el cumplimiento normativo. En conjunto ambos métodos, demuestran que el concreto evaluado cumple con los requisitos propuestos según las normas colombiana NTC 2275, la norma americana NTC 318 y la guía de seguimiento estadístico ACI 214RS-11 en cuanto a la resistencia se refiere, aunque haya una evidente alta variabilidad en los datos y se presente tan solo un dato que no cumple.

Para finalizar, el concreto evaluad se clasifica según la Norma Colombiana NTC 2275 y la norma Americana ACI 24RS-11, como **Malo a Regular** en calidad, a partir de los parámetros obtenidos. A partir de la desviación estándar general (10,56) supera al límite permitido por las normas (4.8) para concreto con resistencias especificadas menores a 35 MPa, lo que evidencia un deficiente control en la producción, mientras que el coeficiente de variación de la prueba(4.4) se encuentra aceptable entre un rango de 4.0% a 5.0% en la norma, lo cual puede indicar que los procedimientos en los ensayos son confiables y que la posible causa de variabilidad puede ser producto del proceso de producción y elaboración del concreto, más que la ejecución de pruebas. Por tanto, se recomienda no solo realizar diseños de mezclas que cumplan con los requisitos de resistencia requerida y de diseño, sino también realizar modificaciones en los procesos de concreto tanto en la dosificación, colocación y transporte, y que permitan garantizar una mayor uniformidad en las tandas y reducir futuros incumplimientos normativos y económicos internos.

Referencias.

American Concrete Institute. (2000). *ACI 116R-00: Terminología del cemento y el concreto*. Farmington Hills, MI: Comité 116 del ACI.

American Concrete Institute. (s.f.). *ACI Concrete Terminology*. http://terminology.concrete.org

American Concrete Institute. (2019). *ACI 318-19: Requisitos de reglamento para concreto estructural y comentario (ACI 318R-19).* Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

American Concrete Institute. (2011). *ACI 214R-11: Guía para la evaluación de resultados de ensayos de resistencia del concreto*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas - ICONTEC. (2010). *NTC 673: Concretos. Muestreo*.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación-ICONTEC. (1997). *NTC 2275: Ingeniería civil y arquitectura. Procedimiento recomendado para la evaluación de los resultados de los ensayos de resistencia del concreto* (Primera actualización).

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente,* NSR-10. Título C.

Anexos.

Anexo1: Poster.

