

EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL
AGREGADO GRUESO EN LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A
COMPRESIÓN DEL CONCRETO EMPLEANDO CILINDROS DE DIFERENTES
DIMENSIONES.



MARTIN AGUSTÍN PERALTA GARCÍA

PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

BARRANQUILLA

2019

EVALUACIÓN DE LA INCIDENCIA DEL TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL
AGREGADO GRUESO EN LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA A
COMPRESIÓN DEL CONCRETO EMPLEANDO CILINDROS DE DIFERENTES
DIMENSIONES

MARTIN AGUSTÍN PERALTA GARCÍA

DIRECTOR

MARIAN SABAU

CODIRECTOR

JORGE GONZÁLEZ CONEO

PROYECTO PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE LA COSTA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

BARRANQUILLA

2019

Nota de aceptación

PRESIDENTE DEL JURADO

JURADO

JURADO

Dedicatoria

Le dedico este logro a mí amada esposa Lucero, a mí amado hijo Josué y a nuestro amado ángel en el cielo: Samuel. Ellos son la fuente fundamental de todos mis propósitos, y los que me animan a ser mejor y disfrutar de las bendiciones concedidas en nuestras vidas. Juntos hemos pasado muchas experiencias que nos han fortalecido en la fe de saber que siempre habrá un mañana mejor y que todas las cosas que nos suceden son la confirmación de motivos que nos unen en la bendición de Dios.

Agradezco también a mis padres, hermanos, familiares y a todos aquellos amigos que han aportado a mi crecimiento personal y de los que recibo todo el apoyo para seguir adelante en mis proyectos. En especial, a los que con su ejemplo me animan hacia la dedicación y la perseverancia como el camino para conseguir logros importantes al servicio propio y al de las personas que nos rodean.

Expreso un sentido y sincero agradecimiento a los Directores de mi proyecto de investigación por su aporte en el logro de esta meta alcanzada. En ellos encontré una orientación generosa y precisa que me permitieron visualizar con claridad el verdadero sentido de la investigación en función de la ciencia para mejorar las condiciones de vida de una sociedad.

A esta Alma Mater por haberme formado en la profesión a la que me dedico y con la que he podido desempeñar un grato rol de servicio en el área de la Ingeniería Civil. Por mí, y por todos aquellos que encuentran ella una oportunidad de educarse y crecer como personas de bien.

Martín Agustín Peralta García

Resumen

La resistencia a compresión del concreto es la medida más frecuente que se utiliza actualmente para medir la calidad y el desempeño del concreto en las obras de construcción. Esta propiedad de este material utilizado en la construcción se mide usualmente mediante la rotura de muestras de concreto elaboradas en estado fresco y ensayadas en su estado endurecido aplicando una carga axial en una máquina de ensayos a la compresión. En particular para las muestras cilíndrica, la normatividad indica que el diámetro de una muestra de forma cilíndrica o la mínima dimensión de una sección transversal rectangular debe ser, por lo menos, 3 veces mayor que el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso de la mezcla del concreto. El presente proyecto de investigación tiene como finalidad realizar un análisis comparativo de la resistencia a la compresión de muestras de concreto ensayadas en tamaños de cilindros de 100x200 mm y de 150x300 mm y Para lo cual, se realiza un muestreo en dos mezclas de diferentes resistencias, variando en cada caso el TMN de agregado grueso en $\frac{3}{4}$ " y 1". Estos cilindros se moldean, curan y ensayan siguiendo los procedimientos estándar requeridos por la normatividad. Los resultados obtenidos se analizarán con referencia a la información técnica disponible de investigaciones realizadas sobre el tema, la cual señala que la resistencia a la compresión esperada en las muestras tomadas en cilindros de 100 mm es superior a las resistencias de los cilindros de 150 mm; así mismo, que el TMN del agregado es un factor de incidencia relevante en los resultados esperados. Las correlaciones y análisis estadísticos de las resistencias en cilindros de diámetro 100 mm contra los de 150 mm para diferentes diseños de mezclas permitirán confirmar las tendencias de incidencia del diámetro del cilindro y las características del agregado grueso; en particular su TMN.

Palabras clave: Tamaño máximo nominal (TMN), concreto ensayadas

Abstract

The compressive strength of concrete is the most common measure currently used to measure the quality and performance of concrete on construction sites. This property of this material used in the construction is measured by breaking concrete samples made in the fresh state and tested in their hardened state by applying an axial load in a compression testing machine. In particular, for cylindrical samples, the regulations indicate that the diameter of a sample of cylindrical shape or the minimum dimension of a rectangular cross-section must be at least 3 times greater than the nominal maximum size (TMN) of the coarse aggregate of the concrete mixture. The purpose of this research project is to carry out a comparative analysis of the resistance to compression of concrete samples tested in cylinder sizes of 100x200 mm and 150x300 mm. For which, a sample is made in two mixtures of different resistances, varying in each case the TMN of coarse aggregate in $\frac{3}{4}$ "and 1". These cylinders are molded, cured and tested following the standard procedures required by the regulations. The results obtained will be analyzed with reference to the available technical information of investigations carried out on the subject, which indicates that the compression resistance expected in the samples taken in cylinders of 100 mm is superior to the resistance of the cylinders of 150 mm; likewise, that the TMN of the aggregate is a relevant incidence factor in the expected results. The correlations and statistical analysis of the resistance in cylinders of diameter 100 mm against those of 150 mm (R100 / R150) for different designs of mixtures will allow confirming the tendencies of incidence of the diameter of the cylinder, the characteristics of the aggregates and the resistance of the concrete.

Keywords: Maximum nominal size (TMN), concrete tested

Contenido

Lista de Tablas y figuras	9
Introducción.....	12
1. Planteamiento del problema	13
2. Objetivos	14
2.1. Objetivo general.....	14
2.2. Objetivos específicos	14
3. Marco teórico y estado del arte.....	15
3.1. Marco teórico.....	15
3.1.1. Concreto	15
3.1.1.1. Definición.....	15
3.1.1.2. Componentes principales	15
3.1.1.2.1. Cemento	15
3.1.1.2.2. Agua.....	16
3.1.1.2.3. Agregados.....	16
3.1.1.2.4. Aire.	16
3.1.1.2.5. Aditivos.....	17
3.1.1.3. Clasificación	17
3.1.1.4. Resistencia a la compresión	18
3.1.1.4.1. Aspectos generales de la resistencia a la compresión.....	18
3.1.1.4.2. Resistencia de los agregados	19
3.1.1.4.3. Resistencia de la pasta de cemento.....	20
3.1.1.4.4. Adherencia pasta-agregado	21
3.1.1.4.5. Comportamiento integral de los componentes	22
3.1.1.4.6. Incidencia del tamaño máximo del agregado	22
3.1.2. Control de calidad.....	23
3.1.3. Evaluación estadística del resultado de los ensayos.....	25
3.1.3.1. Variación entre las pruebas en el desarrollo de un plan de muestreo.....	26
3.1.3.2. Variación dentro de la prueba.....	28
3.1.3.3. Calificación del control.....	29
3.2. Estado del arte.....	31

4.	Diseño metodológico	34
4.1.	Caracterización de materiales.....	34
4.1.1.	Cemento Portland Tipo I.....	34
4.1.2.	Agregados.....	34
4.2.	Dosificación de la mezcla de concreto.....	35
4.3.	Ensayos de inspección y muestreo del concreto.....	41
4.3.1.	Ensayo de asentamiento de la mezcla.....	41
4.3.2.	Elaboración y curado de muestras	42
4.3.2.1.	Moldes, generalidades.....	42
4.3.2.2.	Moldeados de los cilindros.....	43
4.3.2.3.	Remoción de los moldes y curado.....	45
4.3.3.	Método de ensayo de resistencia a la compresión	45
4.3.3.1.	Resumen del método de ensayo.....	45
4.3.3.2.	Significado y uso.....	46
4.3.3.3.	Equipo.....	46
4.3.3.4.	Especímenes.....	47
4.3.3.5.	Procedimiento del ensayo.....	48
5.	Desarrollo experimental	49
5.1.	Ensayos de materiales.....	49
5.1.1.	Cemento.....	49
5.1.2.	Agua.....	50
5.1.3.	Arena.....	50
5.1.3.1.	Granulometría de la arena.....	51
5.1.4.	Grava.....	51
5.1.4.1.	Granulometría de la grava.....	52
5.2.	Aplicación de método para la dosificación de mezclas de concreto.....	53
	53	
5.3.	Elaboración de especímenes y ensayos de resistencia a la compresión.....	54

5.3.1. Elaboración de especímenes.....	55
5.3.2. Desencofrado y curado de especímenes.....	57
5.3.3. Ensayo de rotura de cilindros.....	59
6. Resultados.....	60
6.1. Caracterización de materiales.....	60
6.1.1. Granulometría de la arena.....	60
6.1.2. Granulometría de la grava.....	61
6.2. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión del concreto a los 28 días	64
6.3. Análisis de parámetros estadísticos.....	68
6.4. Análisis basado en la revisión comparativa de la literatura previa.....	73
7. Conclusiones.....	76
Referencias	78
Anexos.....	81

Lista de Tablas y figuras

Tablas.

Tabla 1. Clasificación del concreto según su resistencia	18
Tabla 2. Factores para calcular la desviación estándar dentro de la prueba.....	29
Tabla 3. Normas para el control del concreto con relación a la variación dentro de la prueba.....	30
Tabla 4. Normas para el control del concreto, con relación a la variación total	31
Tabla 5. Descripción de los pasos para la dosificación de mezclas de concreto según la ACI 211.2	36
Tabla 6. Resistencia a la compresión requerida f'_{cr} cuando no haya datos.....	37
Tabla 7. Asentamiento recomendado para diversos tipos de construcción.....	38

Tabla 8. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaño máximos nominales del agregado	38
Tabla 9. Correspondencia entre la relación agua / cemento y la resistencia la compresión del concreto	39
Tabla 10. Relaciones agua / cemento máximas permisibles para concreto sujeto a exposiciones severas	39
Tabla 11. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.....	40
Tabla 12. Cálculo tentativo del peso del concreto fresco.....	40
Tabla 13. Requisito de tamaño, tipo y moldeado	44
Tabla 14. Requisitos para varillas compactadoras.....	44
Tabla 15. Edades de ensayo y tolerancias admisibles.....	48
Tabla 16. Especificaciones técnicas del cemento gris de uso general utilizado.....	49
Tabla 17. Tamaño de la muestra por clase de mezcla.....	54
Tabla 18. Especificación granulométrica de la arena según INV E 213-2013.....	60
Tabla 19. Especificación granulométrica de la grava TMN ¾" según INV E 213-2013 franja N°67	62
Tabla 20. Especificación granulométrica de la grava TMN 1" según INV E 213-2013 franja N°57	63
Tabla 21. Resultado de ensayos mezcla f'c: 21 Mpa TMN 1" en cilindros 150 x 300 mm.....	64
Tabla 22. Resultado de ensayos mezcla f'c: 21 MPa TMN 1" en cilindros 100 x 200 mm	65
Tabla 23. Resultado de ensayos mezcla f'c: 24.5 Mpa TMN ¾" en cilindros 150 x 300 mm....	66
Tabla 24. Resultado de ensayos mezcla f'c: 24,5 MPa TMN ¾" en cilindros 100 x 200 mm....	67
Tabla 25. Resumen de parámetros estadísticos para cada prueba	69

Figuras.

Figura 1. Agua del acueducto de Magangué utilizada para la elaboración de concreto	50
Figura 2. Arena utilizada para la elaboración de concreto	51
Figura 3. Grava de TMN 3/4" y 1" utilizada para la elaboración de concreto	52
Figura 4. Proporciones de la dosificación en la mezcla $f'c$ 21 Mpa TMN 1"	53
Figura 5. Proporciones de la dosificación en la mezcla $f'c$ 24.5 Mpa TMN 3/4"	53
Figura 6. Equipo de mezclado mecánico.....	54
Figura 7. Control de asentamiento	55
Figura 8. Moldes cilíndricos de 100 x 200 y 150 x 300 mm.....	55
Figura 9. Compactación del concreto.....	56
Figura 10. Acabado de cilindros	56
Figura 11. Curado de especímenes antes del desencofre	57
Figura 12. Marcado individual de especímenes	57
Figura 13. Sitio de curado de especímenes	58
Figura 14. Disposición de especímenes en sitio de curado	58
Figura 15. Máquina de ensayo de resistencia a la compresión.....	59
Figura 17. Curva granulométrica de la arena	61
Figura 18. Curva granulométrica la grava TMN 3/4"	62
Figura 19. Curva granulométrica la grava TMN 1"	63
Figura 20. Gráfico de cajas y bigotes de resistencia vs clase de muestra	70
Figura 21. Gráficos de histograma de frecuencia de las resistencias obtenidas	72

Introducción

El uso de cilindros de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura se tomó en muchos países en forma estandarizada debido a que desde el inicio de los estudios en tecnología del concreto se contaba con una serie de pruebas sobre muestras de diferentes tamaños y distintas relaciones altura diámetro, observando que las resistencias obtenidas en cilindros de este tamaño resultaron ser muy semejantes a aquellas para las cuales habían sido diseñado las mezclas, llegándose a establecer sus dimensiones como un patrón para el control o verificaciones de la calidad.

En Colombia se ha empezado a generalizar la opción del uso común de cilindros de 100 mm de diámetro por 200 mm de altura para el control la calidad del concreto ya que ello representa una serie de ventajas, entre otras: mayor rapidez en la elaboración de la muestra, menor uso de cantidad de concreto, facilidad en su manipulación, menor espacio de almacenamiento, requiere menor carga para llegar a la rotura. Estas razones implican mayor economía en el esquema de ensayos.

Para el uso de muestras de 100 por 200 mm la normativa señala que estas muestras podrán utilizarse en mezclas que el tamaño máximo del agregado TMN grueso no exceda 1 pulgada. Asimismo, el Reglamento NSR-10 publicado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica –AIS- comenta que, si bien los cilindros de este tamaño mantienen un nivel de confianza en los resultados, presentan una variabilidad propia del ensayo en aproximadamente un 20% mayores que las correspondientes para ensayos de cilindros de 150 por 300 mm.

Por lo anteriormente expresado, la evaluación del TMN del agregado grueso como un factor de incidencia en de la resistencia a la compresión del concreto elaboradas con diferentes

fuentes de materiales, ofrece una información relevante en los controles de calidad que se realizan en las obras.

1. Planteamiento del problema

Los resultados obtenidos en ensayos de cilindros de concreto son confiables siempre y cuando se atiendan a los procedimientos especificados en las normas que hacen referencia a su elaboración y ensayo de resistencia a la compresión, en los que se señalan instrucciones sobre la relación diámetro altura y su tamaño en función del Tamaño Máximo Nominal TMN del agregado grueso.

Teniendo en cuenta que se tiene las opciones de realizar la toma de muestras en cilindros en moldes de tamaño 150 por 300 mm o 100 por 200 mm, y que este último ofrece mayores ventajas operativas por su manejabilidad y menor volumen de concreto en su elaboración, lo que conlleva al incentivo de su uso, es importante profundizar en el conocimiento de los factores de incidencia en los resultados de ensayos utilizados para el control de calidad de las mezclas de concreto, así como la correlación de las resistencias a la compresión obtenidas en cilindros estandarizados de 100 mm y 150 mm de diámetro, y la incidencia del tamaño máximo del agregado grueso para los diferentes niveles de resistencia establecidos. En línea con lo anterior, la investigación se enfoca en resolver la siguiente pregunta: ¿Cuál es la incidencia del tamaño máximo nominal del agregado grueso en los resultados de ensayos de resistencia a compresión del concretos elaborados con moldes de 100 mm y 150 mm de diámetro, y con diferentes resistencias de diseño?

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Evaluar la incidencia del Tamaño Máximo Nominal del agregado grueso en la resistencia a la compresión f_c del concreto empleando cilindros de 100 y 150 mm de diámetro en mezclas con diferentes resistencias de diseño.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar las propiedades físico-mecánicas del agregado que se utilizará en la preparación del concreto
- Fabricar las probetas con mezclas de concreto con un mismo tipo de agregado fino y grueso, controlando la variación de los parámetros de resistencia y tamaño máximo nominal TMN del agregado grueso.
- Determinar la resistencia a la compresión de las diferentes muestras ensayadas.
- Comparar los resultados obtenidos de los ensayos realizados mediante procedimiento estandarizado de resistencia a la compresión del concreto.

3. Marco teórico y estado del arte

3.1. Marco teórico

3.1.1. Concreto

3.1.1.1. Definición

El concreto u hormigón puede definirse como la mezcla de un aglutinante (cemento), un material de relleno (agregados), agua y eventualmente aditivos, que al endurecer forman un todo compacto y después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos a la compresión (Sanchez de Guzmán, 2001) . El cemento es el material que permite una acción aglutinante de las partículas de agregado fino y grueso usadas en la mezcla, y luego de la reacción química que se genera con el agua conforma un producto pastoso y moldeable que tiene la propiedad de endurecer con el tiempo, convirtiéndose en un material sólido. El agua, además, proporciona la manejabilidad necesaria al momento de elaboración de la mezcla para ser moldeado y ubicado en las formaletas para el fraguado. Debido a la versatilidad de su producción, resistencia, maleabilidad y resistencia el concreto es un material con gran uso en la industria de la construcción.

3.1.1.2. Componentes principales

3.1.1.2.1. Cemento

Es un material que por sus propiedades cohesivas y adhesivas le da la capacidad de aglutinar a los agregados o áridos que conforman el concreto en su estado endurecido. Estas propiedades dependen de su composición, el grado de hidratación, calor de hidratación, módulo de finura y la resistencia mecánica que alcance a desarrollar. El cemento Portland hidráulico, como es reconocido en el medio de la construcción, es la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u

otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. (Asocreto, 2003)

3.1.1.2.2. Agua.

Es el elemento que tiene la propiedad de hidratar las partículas del cemento y permite que desarrolle sus propiedades aglutinantes con los áridos que conforman el concreto.

3.1.1.2.3. Agregados.

Son todos aquellos materiales que teniendo una resistencia propia en su grano, no afectan las propiedades y características del concreto y garantizan la adherencia suficiente con la pasta endurecida del cemento Portland (Sanchez de Guzmán, 2001) . Existen dos tipos de agregados: agregado grueso y fino. El agregado fino es aquel que proviene de la desintegración natural de rocas y tiene un tamaño de partículas que pasa el tamiz 3/8" (9.4 mm). El agregado grueso podrá consistir en piedra fracturada, grava natural o triturada, pudiendo ser de origen natural o artificial; las partículas del agregado grueso se definen como el material retenido en el tamiz N°4 (4.75 mm).

3.1.1.2.4. Aire.

Durante el proceso de mezclado del concreto en su estado plástico es normal que pueda quedar aire atrapado dentro de la mezcla, el cual es liberado en su mayor parte por los procesos de compactación a que es sometido el concreto en su colocación. También es posible que el aire sea incluido intencionalmente en la mezcla para modificar las propiedades del concreto.

3.1.1.2.5. Aditivos.

Un aditivo es un material distinto del agua, agregados y cemento hidráulico usado como ingrediente en concretos y morteros añadidos a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado para modificar una o varias de sus propiedades (Gutiérrez De López, 2003) .

Básicamente, las características que pueden ser modificadas se clasifican según el estado del concreto: fresco o endurecido; para el estado fresco, se destacan las características de manejabilidad, consistencia, plasticidad y velocidad de fraguado; para el estado endurecido, se destacan la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, tensión, durabilidad, permeabilidad, entre otras.

3.1.1.3. Clasificación

La clasificación del concreto se puede presentar de acuerdo a las propiedades y características, su apariencia final, las especificaciones aplicables según las condiciones de servicio para las que fue diseñado en su función estructural y las particulares para el manejo del mismo en su estado fresco.

A continuación, se relacionan las especificaciones que definen las diferentes clases de concretos ofrecidos en el uso comercial:

- Resistencia del concreto.
- Asentamiento.
- Tamaño máximo y tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- Sistema de colocación (Bomba, pavimentadora, pluma, cajones etc.)
- Edad para alcanzar la resistencia de diseño.
- Especificaciones adicionales de acuerdo al proyecto.

La resistencia a la compresión del concreto es una de las propiedades de mayor incidencia en la selección del diseño de la estructura en la que será utilizado. El concepto de esta propiedad depende de cada país y la época que haya permitido al avance en la tecnología del concreto para llegar a producir concretos de alta resistencia. En Estados Unidos se producen concretos comerciales de 8500 psi de resistencia a la compresión, y el concreto de alta resistencia se considera en el rango 11500 a 14000 psi. En Colombia, el rango usual de resistencia a la compresión del concreto varía entre 3000 psi y 6000 psi, hecho que condiciona a la selección de las especificaciones en el diseño de estructuras convencionales dentro del rango mencionado. En la Tabla 1 se muestra la clasificación del concreto según su resistencia en uso habitual en nuestra región.

Tabla 1.

Clasificación del concreto según su resistencia

Descripción convencional	Resistencia a la compresión	
	MPa	psi
Normal	7.0 – 42.0	1000 – 6000
Alta Resistencia	42.0 – 98.0	6000 – 14000
Ultra Alta resistencia	Más de 98.0	Más de 14000

Fuente: (Sanchez de Guzmán, 1996)

3.1.1.4. Resistencia a la compresión

3.1.1.4.1. Aspectos generales de la resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto es la que normalmente identifica a su resistencia mecánica, porque este tipo de condición de carga presenta mayor capacidad para soportar los esfuerzos a que será sometido, debido a que con mayor frecuencia los elementos

estructurales se diseñan para aprovechar esta propiedad. En este sentido, la resistencia a la compresión es la característica que en la práctica puede ser determinada con mayor facilidad y confiabilidad en el concreto en su estado endurecido.

El concreto endurecido desarrolla una resistencia mecánica que conlleva a que tenga propiedades que lo identifiquen con su buen comportamiento para resistir diferentes tipos de carga.

La resistencia que puede llegar a desarrollar el concreto depende básicamente de la resistencia individual de los agregados y de la pasta de cemento endurecida, y de la adherencia que se produce entre ambos materiales. A estos factores se suma el grado de densificación que se puede alcanzar en la etapa del concreto durante su estado fresco y colocación en la estructura; es decir el retiro de los vacíos que pudieran llegar a quedar incorporados en el concreto en estado endurecido y pudieran llegar a afectar su resistencia. Luego de colocado el concreto en la estructura debe realizarse la acción de curado, la cual forma parte de las actividades en obra que son complementarias para que el concreto alcance a desarrollar la resistencia potencial del diseño de mezcla.

3.1.1.4.2. Resistencia de los agregados

La resistencia de los agregados incide en el mayor grado de dureza y resistencia que estos tengan. Cuando las partículas de los agregados son resistentes, la resistencia mecánica del concreto tiende a ser influenciada por la resistencia que tenga la pasta de cemento o la adherencia de esta con los agregados. De otro modo, cuando en una mezcla de concreto los agregados presentan poca resistencia, la resistencia de los mismos limita la resistencia que podrá alcanzar el concreto, debido a que el concreto como un material integral no podrá ser más resistente que las partículas individuales de los agregados. Es importante que en un diseño de mezcla se considere

una interacción adecuada entre la pasta de cemento y los agregados, de manera que el aporte de resistencia de los elementos individuales sea equitativa y no depender excesivamente de la resistencia de la pasta, lo que también implica un alto costo del concreto ante la necesidad de los incrementos del consumo de cemento.

3.1.1.4.3. Resistencia de la pasta de cemento

La pasta de cemento adquiere su resistencia mecánica a mediada que endurece debido al proceso de hidratación de los granos de cemento inmediatamente es mezclado con el agua. Cuando la pasta se encuentra en la etapa de fraguado se inicia en la periferia de los granos de cemento la formación de un tejido filamentosos, constituido por los productos de hidratación denominados “gel de cemento”. En la medida que estos productos aumentan, ocupan los espacios ocupados por la solución acuosa y sirven de puente aglutinante de los granos de cemento para darle rigidez a la pasta, que de este modo adquiere el fraguado, pasando así de su condición inicial de masa blanda y viscosa a la de un cuerpo rígido pero frágil, prácticamente sin adquirir una resistencia mecánica al fraguar.

El proceso de hidratación de los granos de cemento se debe dar en condiciones favorables de temperatura, en presencia de agua y bajo condiciones favorables, con el fin de que se propicie la formación de más productos de hidratación que ocupen los espacios intersticiales de la pasta, reduciendo así su porosidad e incremento progresivo de su resistencia mecánica. Luego de elaborada la pasta, este proceso se desarrolla con relativa rapidez durante los primeros días, y después disminuye su velocidad en un comportamiento asintótico. Si las condiciones de humedad y temperaturas continúan siendo favorables, el proceso de hidratación del cemento y de adquisición de resistencia mecánica de la pasta puede prolongarse durante meses o años. Por tal

motivo y para fines prácticos se ha adoptado un plazo de 28 días para considerarla totalmente hidratada o endurecida.

3.1.1.4.4. Adherencia pasta-agregado

Considerando el trabajo conjunto entre los agregados y la pasta de cemento en el concreto endurecido puede suponerse que, si las resistencias individuales de los agregados y la pasta no son restrictivas, la resistencia última del concreto dependerá en gran medida de la adherencia que se pueda alcanzar entre ambos componentes de la mezcla. No obstante, aunque la resistencia de la pasta como la adherencia progresa con la hidratación del cemento, su evolución no necesariamente es igual, hay evidencia de que en concretos a edades tempranas se presenten resistencias por adherencia menor que la de la pasta, en tanto que a edades avanzadas tiendan a ocurrir lo contrario.

Conforme a esa tendencia se puede inferir que, con agregados ordinarios de buena calidad, la resistencia mecánica del concreto a la edad de servicio debiera depender principalmente de la resistencia de la pasta. Aun cuando en la práctica esta es una condición frecuente, su vigencia no puede ser generalizada debido a que hay aspectos particulares que la pueden modificar, tales como la forma, textura superficial y tamaño de las partículas de los agregados, y el nivel de la resistencia del concreto, entre otros. Una condición ideal en el diseño de mezcla es que exista una compatibilidad entre la resistencia de la pasta y la generada por la adherencia entre esta y los agregados, lo cual conlleva a pensar que no tiene sentido práctico tratar de incrementar la resistencia del concreto cuando se presentan condiciones de falta de adherencia. En esta situación, lo más conveniente es implementar acciones que mejoren la adherencia entre la pasta y

los agregados, a fin de elevar el umbral de falla del concreto por este concepto, para luego adecuar la resistencia de la pasta al nivel requerido.

Para mejorar la adhesión de la pasta con los agregados, cuando exista deficiencia de la misma atribuible a éstos, hay la posibilidad de modificar las características antes mencionadas de la forma, textura superficial y tamaño de las partículas, en la medida del grado de incidencia que estas características sea el causante de las deficiencias observadas en la adherencia. Un caso frecuente es cuando se tienen agregados con partículas muy redondeadas y de superficies muy lisas, lo cual puede dificultar y hace antieconómico rebasar el tope de resistencia que se pretende alcanzar en el concreto debido a la reducida adherencia que suelen manifestar este tipo de partículas con la pasta de cemento

3.1.1.4.5. Comportamiento integral de los componentes

La resistencia mecánica como un todo es influida por las resistencias individuales de los agregados, la pasta de cemento y por la adherencia entre ambos componentes, y en fin de cuentas la resistencia del conjunto es dictada por la que resulte más débil de las tres. En general, la resistencia intrínseca de los agregados de calidad normal es superior a la que se requiere en el concreto convencional, de manera que lo más común es que la resistencia del concreto sea gobernada por la pasta de cemento y/o por el grado de adherencia en el contacto entre la pasta y el agregado.

3.1.1.4.6. Incidencia del tamaño máximo del agregado

El aumento del tamaño máximo del agregado presenta una manifestación con dos efectos opuestos en la resistencia mecánica del concreto:

- 1) El aumento del tamaño máximo reduce el requerimiento de agua de la mezcla y en consecuencia se disminuye la relación agua/cemento, con lo que se tiende a incrementar la resistencia del concreto.
- 2) En contraposición, el aumento del tamaño de las partículas disminuye la superficie de contacto de los agregados con la pasta, y con ello se tiende a reducir la resistencia del concreto porque para una misma condición de carga se incrementan los esfuerzos de adherencia en el contacto pasta agregado.

Al hacer el balance de estas tendencias, resulta que en los concretos de baja resistencia (menos de 21 MPa aproximadamente) prima el efecto de la reducción de agua de mezclado, y por consiguiente al aumentar el tamaño máximo, la resistencia del concreto se tiende a incrementar; por otro lado, para los concretos de mayor resistencia se manifiesta el efecto contrario, pues domina la condición de la superficie de adherencia disminuida, de manera tal que un aumento en el tamaño máximo tiende a reducir la resistencia del concreto a sus niveles altos.

3.1.2. Control de calidad.

La calidad es un proceso para alcanzar una característica que satisface un requerimiento deseado. Esta característica puede ser cualitativa o cuantitativa. Este concepto se ha ido perfeccionando en la medida en que los criterios para la oferta de productos y servicios se han perfeccionado.

En el caso del concreto se puede alcanzar los requisitos de calidad, siempre que se cumpla rigurosamente con la calidad requerida en cada uno de los siguientes aspectos:

- a) Componentes individuales.
- b) Procedimientos de diseño.

- c) Técnicas de producción.
- d) Transporte, colocación y proceso de curado.
- e) Muestreo y pruebas de laboratorio.

Para el control de calidad del concreto en la industria de la construcción se hace referencia a las normas y especificaciones de diseño. Al respecto, el comité (ACI 318-14, 2014) establece claramente los procedimientos que deben seguirse para la selección de los materiales, dosificación de la mezcla de concreto, producción, manejo, instalación y curado. Este comité también considera las investigaciones recopiladas y publicadas por otros comités del ACI.

Para el diseño del concreto, el comité (ACI 211.2, 1998) presenta recomendaciones para la dosificación de la mezcla. En cuanto al análisis estadístico, se utilizan las recomendaciones del comité (ACI 214, 2011). Para la confección de las muestras y las pruebas de laboratorio, se hace referencia a las normas ASTM.

En la etapa de producción del concreto se introducen variaciones, que pueden influir en la resistencia u otro requerimiento. Una fuente es la variación en las propiedades, tales como el cambio en la relación A/C, requerimientos de agua, características de los ingredientes, transporte y colocación. Temperatura y cura. La otra es la variación en los métodos de prueba, entre los cuales se puede señalar el procedimiento incorrecto de muestreo, la técnica de fabricación de cilindros, moldes de calidad deficiente, cambios durante curado de temperatura y humedad y el procedimiento de las pruebas. La variabilidad del concreto, debe ser considerada en un programa para el control de calidad, ya que por tratarse de un material estructural tiene un fuerte impacto en la seguridad de la obra en construcción.

3.1.3. Evaluación estadística del resultado de los ensayos.

En línea con lo comentado anteriormente acerca de que las mezclas de concreto en su estado endurecido son materiales heterogéneos en las que sus propiedades están sometidas a la influencia de muchas variables, es necesario llevar a cabo procedimientos estadísticos para considerar y manejar la variabilidad que puedan tener las mismas. De acuerdo con el (ACI 214, 2011) estas fuentes de variación y su magnitud pueden originarse de las siguientes causas:

- Las características y variabilidad de los materiales componentes (material cementante, agregados, agua y aditivos)
- Los procedimientos y técnicas de dosificación, mezclado y manejo.
- Las variaciones propias de la elaboración y tratamiento de los especímenes y de los métodos de ensayo.

Sabiendo que los resultados de resistencia del concreto están afectados por numerosas fuentes de variación además de que, desde el punto de vista práctico, es absolutamente imposible garantizar que cada espécimen de ensayo (elaborado de una misma mezcla), arroje exactamente el mismo valor central y dentro de un rango de valores. (Sanchez de Guzmán, 1996).

Por tal razón, el (NSR, 2010) define una prueba de resistencia como el resultado del promedio de resistencia de dos cilindros tomados de una misma mezcla y ensayados a los 28 días, o la edad especificada en cada caso que sea diferente a esta edad. Del mismo modo, especifica que “Podría ser deseable contar con más de un número mínimo de probetas de ensayo de manera que permita el descarte de cilindros individuales con resistencia por fuera de rango según el (ACI 214, 2011) Cuando las resistencias de cilindros individuales son descartadas de acuerdo con el (ACI 214, 2011) un ensayo de resistencia será válido siempre que se promedien

las resistencias de al menos dos cilindros individuales de 150 por 300 mm o de al menos tres cilindros de 100 por 200 mm”.

Teniendo en cuenta que cada prueba de resistencia indica un valor potencial de la misma, y que debido a esto debe analizarse de manera aislada, los datos obtenidos de las pruebas de resistencia (de un mismo lote) deben agruparse con el fin de analizar cuál es la tendencia de esa población de resultados alrededor de un valor central que caracterice el comportamiento.

Para que los procedimientos estadísticos de evaluación tengan validez, los datos deben derivarse de muestras obtenidas durante el desarrollo de un plan de muestreo y partiendo de la base que las muestras tomadas y los ensayos efectuados representan el concreto producido para aceptar los resultados de resistencia. La agrupación de los datos permite realizar un análisis de los resultados con base a la distribución de frecuencia y a la variación dentro de la prueba.

3.1.3.1. Variación entre las pruebas en el desarrollo de un plan de muestreo.

Para que un análisis sea representativo utilizando la distribución normal de frecuencias, con el polígono de frecuencias llamado “Campana de Gauss”, y cuyas propiedades se definen matemáticamente, se debe disponer de una cantidad de datos suficientes de pruebas, para obtener una mayor información confiable. Así, el número de pruebas debe disponer como mínimo de 30 datos, en donde cada dato debe ser el resultante del promedio de ensayos individuales de la misma edad. (ACI 214, 2011). A continuación, se muestran los principales parámetros estadísticos utilizados para la interpretación y verificación de los resultados según lo establecido en el Manual de Control de calidad del concreto en obra. (Osorio, 2003).

- Promedio aritmético (\bar{X}): El promedio aritmético se define como la suma aritmética de los resultados de resistencia de todas las pruebas individuales dividiéndolo por el total de pruebas efectuadas.

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 \dots + x_n}{N} \quad (1)$$

- Desviación estándar (S): La desviación estándar de un lote de pruebas refleja las variaciones entre las diferentes amasadas de concreto, es decir entre las pruebas. Estas variaciones, contemplan la variabilidad de cada uno de los materiales, la variabilidad de los procedimientos y técnicas de producción y manejo, las variaciones propias de la elaboración y curado de los especímenes, es decir que esta desviación comanda la dispersión entre las pruebas realizadas.

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (2)$$

- Coeficiente de variación: Cuando se conoce la dispersión de las pruebas, se puede obtener el coeficiente de variación el cual está definido en términos de la desviación estándar, expresada como un porcentaje del promedio aritmético.

$$V = \frac{s}{\bar{x}} * 100 \quad (3)$$

- Intervalo o Rango (R): Se obtiene restando la menor de las resistencias del conjunto de cilindros que conforman la prueba, de la más alta del grupo.

$$R = R_a - R_b \quad (4)$$

3.1.3.2. Variación dentro de la prueba.

Existen unas fuentes de variación de los resultados de resistencia a la compresión del concreto que son inherentes a la prueba misma. Por esta razón, es importante que además del análisis del promedio aritmético y sus correspondientes medidas de dispersión en un conjunto de pruebas, se verifique la uniformidad de los resultados de cada prueba. Se entiende como prueba la definición citada anteriormente en cuanto a que es “el resultado del promedio de resistencia de dos cilindros tomados de una misma mezcla y ensayada a los 28 días (...)”. (Sanchez de Guzmán, 1996).

En este sentido, para la determinación de la variación en la resistencia dentro de una prueba única se calcula la variación a partir de un grupo de cilindros elaborados de una muestra de concreto, tomada de una mezcla determinada. Para obtener los datos suficientes para una análisis estadístico se requieren cilindros compañeros de, por lo menos, diez muestras de concreto a fin de establecer valores confiables de intervalo promedio según lo establecido por la (ACI 214, 2011). A continuación, se muestran los principales parámetros estadísticos utilizados para la interpretación y verificación de los resultados.

- Intervalo o Rango promedio (\bar{R}):

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 \dots + R_n}{N} \quad (5)$$

- Desviación estándar dentro de la prueba (S_1): Se determina teniendo en cuenta que su valor depende de la cantidad de ensayos (cilindros) dentro de la prueba según los factores indicados en la Tabla 2.

$$S_1 = \frac{1}{d_2} \bar{R} \quad (6)$$

Tabla 2.

Factores para calcular la desviación estándar dentro de la prueba

N° de Cilindros	d ₂	1/d ₂
2	1.128	0.8865
3	1.693	0.5907
4	2.059	0.4857
5	2.326	0.4299
6	2.534	0.3946
7	2.704	0.3698
8	2.847	0.3512
9	2.970	0.3367
10	3.078	0.3249

Fuente: (ACI 214, 2011)

- Coeficiente de variación dentro de la prueba (V₁): El coeficiente de variación dentro de la prueba es representativo para calificar el nivel de control en la elaboración y tratamiento de los especímenes y la calidad de los métodos de ensayo, tanto para trabajo de campo, como para las investigaciones a nivel de laboratorio. Esta medida de dispersión se determina como un porcentaje del promedio aritmético.

$$V_1 = \frac{S_1 \times 100}{\bar{X}} \quad (7)$$

3.1.3.3. Calificación del control.

La variabilidad que puede esperarse de las pruebas de resistencia a la compresión califica el grado de control existente en términos de desviación estándar y del coeficiente de variación. Estos parámetros representan una medida adecuada de la dispersión de determinada situación, dependiendo de cuál de las dos medidas es la constante más cercana a las características de resistencia, a través de un intervalo de resultados, de esa situación particular. Se ha comprobado

que la desviación estándar permanece como una constante más aproximada para resistencias superiores a 21 MPa; por lo que se considera más apropiado el coeficiente de variación para la calificación de variaciones dentro de la prueba. (Sanchez de Guzmán, Tecnología del concreto y del mortero, 2001).

El comité (ACI E 704-4, 1974) preparó una tabla que muestra la variabilidad que puede esperarse de las pruebas de resistencia a la compresión en proyectos sujetos a diferentes grados de control. Estos valores se indican en las Tablas 3 y 4 y no se aplican a otras pruebas de resistencia.

Tabla 3.

Normas para el control del concreto con relación a la variación dentro de la prueba

PRODUCCIÓN DE UNA SOLA MEZCLA-VARIACIÓN EN LA PRUEBA				
Coeficiente de variación para diferentes grados de control (%)				
Excelente	Muy Bueno	Bueno	Aceptable	Pobre
PRUEBAS DE CONTROL DE CAMPO (En obra o en planta)				
Por debajo de 3	de 3 a 4	de 4 a 5	de 5 a 6	Sobre 6
MEZCLAS DE PRUEBA EN EL LABORATORIO				
Por debajo de 2	de 2 a 3	de 3 a 4	de 4 a 5	sobre 5

Fuente: Norma ACI E 704-4, 1974

Tabla 4.

Normas para el control del concreto, con relación a la variación total

PRODUCCIÓN GENERAL – VARIACIÓN TOTAL				
Desviación estándar para diferentes grados de control (Kg/cm ²)				
Excelente	Muy Bueno	Bueno	Aceptable	Pobre
PRUEBAS DE CONTROL DE CAMPO (En obra o en planta)				
Por debajo de 25	de 25 a 35	de 35 a 40	de 40 a 50	Sobre 50
MEZCLAS DE PRUEBA EN EL LABORATORIO				
Por debajo de 15	de 15 a 17	de 17 a 20	de 20 a 25	sobre 25

Fuente: Norma ACI E 704-4, 1971

3.2. Estado del arte

Investigaciones realizadas sobre los efectos del tamaño de la muestra en la resistencia de concreto convencional reportan como el incremento del tamaño del cilindro aumenta la relación del esfuerzo para el fallo a la compresión y disminuye la resistencia a la compresión del concreto, (Gonnermann, 1925).

Otras investigaciones relacionadas con la el tamaño del cilindro observan como su incremento hace decrecer la resistencia (Blanks & McNamara, 1935). En este sentido, se logró establecer correlaciones entre la forma y el tamaño del espécimen y la resistencia a la compresión, presentando unas propuestas de modelos de predicción de la resistencia a la compresión del concreto basados en la geometría del espécimen (Neville, 1966).

Un estudio realizado acerca de la resistencia a la compresión de cilindros de 102 x 203 mm y 152 x 305 mm en rangos de edad entre los 3 día y 8 meses presenta resultados en los ensayos en los que se observa como la diferencia de la resistencia a la compresión de los dos tamaños aumenta con el incremento del nivel de resistencia del concreto. (Malhotra, 1976).

En forma más reciente, se destacan las investigaciones llevadas a cabo por Bazant, el cual investigó los diversos aspectos del efecto de tamaño en el concreto y publicó varios artículos con coautores, recogiendo sus obras en dos libros (Bazant & Oh, 1984) y (Bazant & Planas, 1998).

En esta línea de investigación se cuenta con estudios en donde se compara la resistencia a la compresión del concreto medida en cilindros de tamaño particular de 100 mm de diámetro por 200 mm y en cilindros de 150 mm por 300 mm, los mismos muestran que en promedio la resistencia en cilindros de 100 mm de diámetro es un 10% mayor a la resistencia medida en cilindros de 150 mm de diámetro, presentando también una desviación estándar en el orden de un 20%, mayor a la obtenida en los cilindros de 150 mm. (Aragón Matamoros & Navas Carro, 2012). En contraste con lo anterior, otros estudios concluyen que, para diferentes niveles de resistencia a la compresión ensayados, la resistencia obtenida en general es mayor en cilindros de 150 mm de diámetro respecto a los de 100 mm de diámetro y de 75 mm de diámetro, observando que esa resistencia disminuye cuando el tamaño del cilindro disminuye y también cuando el TMN del agregado pasa de $\frac{3}{4}$ " a 1". (Barbosa Guzmán & Gallardo Eraso, 1997).

Las investigaciones más recientes se realizan para evaluar los efectos del tamaño y la forma en concretos de propiedades particulares. Para ensayos de resistencia a la compresión de concretos de alta resistencia se ha reportado que no existen efectos significativos por la relación diámetro longitud de los cilindros utilizados para la toma de muestras (Tokyay & Ozdemir, 1997); otros realizados con este mismo propósito, concluyen en ensayos realizados en probetas de formas cilíndricas y cúbicas de diferentes tamaños que las probetas grandes resisten menos esfuerzo que las pequeñas, el efecto del tamaño en las formas cúbicas es mucho más fuerte que la cilíndrica, en donde la resistencia promedio obtenida tiene una tendencia a ser constante (del Viso, Carmona, & Ruiz, 2007) .

Así mismo, se han llevado a cabo estudios experimentales y numéricos en concretos autonivelantes examinando el efecto de la forma y el tamaño en la resistencia a la compresión (Dehestani, Nikbin, & Asadollahi, 2014). Sobre las incidencias del tamaño del agregado grueso en la resistencia de concretos autonivelantes se cuenta con información resultante de estudios realizados a ensayos que relacionan también el efecto de los plastificantes y abordan el caso particular de concretos ligeros. (Mardani-Aghabaglou, Tuyan, Yılmaz, Ariöz, & Ramyar, 2013) (Karamloo, Mazloom, & Payganeh, 2016) Investigaciones realizadas en concretos reforzados con fibra de vidrio muestra como las probetas de tamaños pequeños dan mayores resistencias a la compresión en comparación con los de mayor tamaño. La disparidad en la resistencia a la compresión para los tamaños en formas cúbicas y cilíndricas se reduce con el aumento en la fracción de volumen de la fibra de vidrio. (Jihad Hamad, 2015).

Ensayos realizados a muestras de concretos de diferentes resistencias, tamaño del agregado y en diferentes tamaños de cilindros conducen a la presentación de un marco alternativo basado en una interpretación de la falla de compresión de materiales heterogéneos como una transición crítica de un estado intacto a un estado fallido, que libera las hipótesis subyacentes de la teoría del eslabón más débil. (Cong Vu, Weiss, Plé, Amitrano, & Vandembroucq, 2018).

La falla a la compresión del concreto es un fenómeno muy complejo y las incidencias del tamaño han sido a menudo ignoradas en la literatura y por lo tanto se necesitan más investigaciones experimentales y teóricas. Desde el punto de vista experimental el efecto del tamaño del concreto, especialmente en compresión, no es fácil de investigar porque se trata de diferentes tamaños de muestras geoméricamente similares, mientras que se deben aplicar las

mismas condiciones de contorno para todos los tamaños de muestras. (Muciaccia, Rosati, & Di Luzio, 2017).

4. Diseño metodológico

4.1. Caracterización de materiales.

4.1.1. Cemento Portland Tipo I

El cemento utilizado para la elaboración de mezclas de concreto en la presente investigación es el cemento Portland Tipo I, marca ARGOS, el cual cumple con los requisitos establecidos en la Norma ASTM C1157-C1157M-11, con propiedades garantizadas por la empresa fabricante, las cuales son en la ficha técnica del producto, en las que se encuentran la Densidad del Cemento Hidráulico (ASTM C188-17) y la Finura del Cemento Hidráulico (ASTM C204-11).

4.1.2. Agregados

Los materiales son provenientes de canteras de uso frecuente en las obras de infraestructura de la región. El agregado fino es arena natural proveniente de canteras de la zona del Copey en el Departamento del Cesar. En cuanto al agregado grueso, es proviene de las canteras de la zona de Tolú en el Departamento de Sucre en donde los procesos de producción se realizan mediante plantas de trituración y con extracción de la materia prima en formaciones calizas.

Los agregados fino y grueso debe cumplir con unos requisitos para la elaboración de concreto establecidos en Norma ASTM C33/C33M-18, y su equivalente en la sección INV E 200 –2013 Agregados pétreos, para lo cual se realizaron ensayos que se describen a continuación; con un proceso previo de toma de muestras representativas del acopio de agregados según la Norma ASTM C702/C702M-18:

- a) Ensayo de densidad, densidad relativa y absorción de agregados gruesos según la Norma ASTM C127-15.
- b) Ensayo de densidad, densidad relativa y absorción de agregados finos según la Norma ASTM C128-15.
- c) Ensayos de pesos unitarios de los agregados según la Norma ASTM C29-07.
- d) Análisis granulométricos de los agregados según la Norma ASTM C136-06.
- e) Ensayos de impurezas orgánicas de los agregados según la Norma ASTM C40/C40M-19.

4.2. Dosificación de la mezcla de concreto.

La dosificación de una mezcla de concreto permite determinar la proporción más precisa de los materiales que lo conforman para alcanzar las características esperadas en términos de manejabilidad en su estado plástico y para que en su estado sólido adquiriera las propiedades principales de durabilidad y resistencia a la compresión según las especificaciones particulares de su uso.

El método de diseño de mezcla que se utilizará de guía en la presente investigación es según la norma (ACI 211.2, 1998) el cual consiste en la realización de un proceso que determina las cantidades relativas de cada material con los que se dosifica la mezcla para lograr un concreto con las especificaciones requeridas. La selección de las proporciones se basa en los resultados de ensayos realizados a los materiales que se van a usar, obteniendo la siguiente información principal:

- Análisis granulométrico de los agregados. Cálculo del Módulo de Finura (MF) del agregado fino y Tamaño Máximo Nominal (TMN) del agregado grueso.

- Densidad aparente seca, masa unitaria compacta y humedad de absorción de los agregados.
- Humedad de los agregados antes de realizar las mezclas de concreto.

En la siguiente tabla se muestra el procedimiento paso a paso para la dosificación de mezclas utilizando la norma (ACI 211.2, 1998).

Tabla 5.

Descripción de los pasos para la dosificación de mezclas de concreto según la ACI 211.2

PASO	DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO	DATOS DE REFERENCIA
1	Selección del asentamiento	Tabla 6.3.1. ACI 211. Revenimiento recomendados para diferentes tipos de construcción
2	Selección del Tamaño Máximo Nominal TMN del agregado grueso	Recomendaciones NSR 10: <ul style="list-style-type: none"> • 1/5 de la menor dimensión de la sección estructural • 1/3 del espesor de losas • 3/4 del espaciamiento mínimo libre entre varillas o alambres individuales de refuerzo, paquetes de varillas, cables y/o ductos
3	Estimación de los contenidos de agua (A) y aire atrapado	Tabla 6.3.3. ACI 211. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y Tamaños Máximos Nominales de agregados.
4	Selección de la relación Agua/Cemento	Tabla 6.3.4 (a). ACI 211. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto. Tabla 6.3.4 (b). ACI 211. Relación agua/cemento máximas para concreto a exposiciones severas.
5	Cálculo del contenido de cemento	A partir de la relación agua/cemento (A/C) selecciona por resistencia o exposición.
6	Estimación del contenido del agregado grueso	Tabla 6.3.6. ACI 211. Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.

PASO	DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO	DATOS DE REFERENCIA
		Tabla 6.3.7.1. ACI 211. Cálculo tentativo del peso del concreto fresco
7	Estimación del contenido de agregado fino	Diferencia de los pesos totales de los materiales calculados
8	Cálculo de proporciones iniciales	Las proporciones de indican en forma relativas de pesos, tomando como unidad el cemento: Cemento/Agregado fino y Agregado grueso
9	Ajuste por humedad de los agregados	El agua de la mezcla se debe ajustar en una cantidad igual a la humedad libre de los agregados menos su absorción.
10	Ajuste a las mezclas de prueba	

Fuente: Elaboración propia.

Un paso que se incluye en la metodología de dosificación de mezclas, y que se presenta luego de la estimación de los contenidos de agua y aire, es la Determinación de la Resistencia de Diseño. El concreto debe dosificarse para asegurar una resistencia a la compresión promedio lo suficientemente alta para minimizar la cantidad de resultados por debajo del valor de resistencia especificada f'_c . la (ACI 318-14, 2014) indica que cuando una instalación productora de concreto no tenga registros de ensayos de resistencia en obra para el cálculo de la resistencia promedio a la compresión requerida f'_{cr} debe determinarse según la Tabla 6.

Tabla 6.

Resistencia a la compresión requerida f'_{cr} cuando no haya datos

Resistencia especificada a la Compresión	Resistencia promedio requerida a la compresión
$f'_c < 21 \text{ MPa}$	$f'_{cr} = f'_c + 7 \text{ MPa}$
$21 \text{ MPa} \leq f'_c \leq 35 \text{ MPa}$	$f'_{cr} = f'_c + 8.5 \text{ MPa}$
$f'_c \geq 35 \text{ MPa}$	$f'_{cr} = 1.10 f'_c + 5 \text{ MPa}$

Fuente: Norma ACI 318-14

Para el caso en estudio se utiliza la resistencia a la compresión especificada para la dosificación de la mezcla, teniendo en cuenta que se requiere observar las variaciones de resultados con respecto al promedio y establecer las comparaciones correspondientes a los diferentes tipos de materiales y tamaños de especímenes.

A continuación se muestran las tablas relacionadas en el método (ACI 211.2, 1998) para la dosificación de mezclas de concreto utilizadas en el paso a paso contenido de la Tabla 5:

Tabla 7.

Asentamiento recomendado para diversos tipos de construcción

Tipos de construcción	Asentamiento (cm)	
	Mínimo	Máximo
Muros de contención y zapatas reforzadas	2.5	7.5
Cimientos corridos y muros de subestructura	2.5	7.5
Vigas y muros reforzados	2.5	10.0
Columnas para edificios	2.5	10.0
Pavimentos y losas	2.5	7.5
Concreto masivo	2.5	7.5

Fuente: Norma ACI 211.2-98.

Tabla 8.

Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaño máximos nominales del agregado

Asentamiento, cm	Agua, kg/m ³ concreto para TMN, mm							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Concreto sin aire incluido								
De 2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
De 7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
De 15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	---
Cantidad aprox. Aire atrapado	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								

De 2.5 a 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
De 7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119
De 15 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	---
Promedio recomendado por incluir por exposición								
Exposición ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
Exposición moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
Exposición severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Fuente: Norma ACI 211.2-98.

Tabla 9.

Correspondencia entre la relación agua / cemento y la resistencia la compresión del concreto

Relación Agua/Cemento por peso		
Resistencia a la compresión a los 28 días MPa	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
42	0.41	--
35	0.48	0.40
28	0.57	0.48
21	0.68	0.59
14	0.82	0.74

Fuente: Norma ACI 211.2-98.

Tabla 10.

Relaciones agua / cemento máximas permisibles para concreto sujeto a exposiciones severas

Tipo de estructura	Estructura continua o frecuentemente mojada y expuesta a congelación y deshielo	Estructura expuesta al agua de mar o a sulfatos
Sección esbelta y secciones con menos de 3 cm	0.45	0.40
Todas las demás estructuras	0.50	0.45

Fuente: Norma ACI 211.2-98

Tabla 11.

Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto

Tamaño máximo Nominal del Agregado TMN		Módulo de finura de la arena			
mm.	Pulg.	2.4	2.6	2.8	3.0
9.5	3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
19	3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
25	1"	0.71	0.69	0.67	0.65
38	1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
50	2"	0.78	0.76	0.74	0.72
75	3"	0.82	0.80	0.78	0.76
150	6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Norma ACI 211.2-98.

Tabla 12.

Cálculo tentativo del peso del concreto fresco

Tamaño máximo Nominal del Agregado TMN		Cálculo tentativo del peso del concreto kg/m ³	
mm.	Pulg.	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
9.5	3/8"	2280	2200
12.5	1/2"	2310	2230
19	3/4"	2345	2275

25	1”	2380	2290
38	1 ½”	2410	2350
50	2”	2445	2345
75	3”	2490	2405
150	6”	2530	2435

Fuente: Norma ACI 211.2-98

4.3. Ensayos de inspección y muestreo del concreto.

4.3.1. Ensayo de asentamiento de la mezcla

El proceso de elaboración de especímenes implica la realización previa del ensayo de asentamiento de la mezcla de concreto, el cual es una medida de su trabajabilidad que indica que tan seca o fluida está cuando se encuentra en estado plástico para el cual fue diseñado la mezcla. El método de ensayo utilizado para medir el asentamiento es el descrito en la norma NTC 396: 1992 que en términos generales consiste en lo siguiente:

- Se coloca un molde conocido como cono de Abrams sobre una superficie horizontal, plana y no absorbente, presionando con los pies las agarraderas para que no se salga el concreto por la parte inferior del molde.
- Luego se procede a llenar el molde en tres capas de aproximadamente el mismo volumen, apisonándose cada capa con 25 golpes dados con una varilla de 16 mm de diámetro, 60 cm de longitud y de extremo redondeado. La introducción de la varilla por el lado redondeado se debe realizar buscando diferentes sitios de la superficie y hasta una profundidad tal que penetre ligeramente en la capa inferior que se está compactando, de manera que se distribuya uniformemente sobre la sección transversal.
- Al terminar la tercera capa, se enrasa la superficie y se retira la mezcla que haya caído en la zona adyacente a la base del molde; luego el cono se levanta cuidadosamente en

dirección vertical, sin producir movimientos laterales o de torsión y cuidando de no tocar la mezcla con el molde cuando éste se ha separado del concreto.

- Una vez retirado el molde, la muestra presenta un asentamiento, de ahí el nombre del ensayo, el cual se mide como la diferencia entre la altura del molde y la altura medida sobre el centro de la base superior del espécimen.

4.3.2. Elaboración y curado de muestras

La norma NTC 550: 2000, que es equivalente a la ASTM C 31/C31M-09, es la que establece los procedimientos para la elaboración y curado de especímenes cilíndricos y prismáticos, tomados de muestras representativas de concreto fresco.

Como recomendación general, la norma indica que el concreto utilizado para elaborar los especímenes mediante el moldeado debe tener los mismos niveles de asentamiento, contenido de aire y agregado que el concreto que representa. La norma antes citada aplica para concretos en los que el asentamiento sea medible y no requieran otras formas de especímenes para representar un producto o estructura.

4.3.2.1. Moldes, generalidades.

Según lo establecido en la norma los moldes para la elaboración de especímenes de concreto deben ser de acero, hierro fundido o de cualquier otro material no absorbente y no reactivo con el concreto que contiene cemento portland u otro cemento hidráulico; deben mantener sus dimensiones sin deformarse bajo las condiciones en que serán usados. Los moldes deben ser herméticos al agua durante su utilización, lo cual se evalúa por su capacidad para mantener el agua vertida dentro de ellos. Se debe proveer un medio eficaz para sostener firmemente las placas de base de los moldes. Los moldes reutilizables deben ser recubiertos de

una película ligera de aceite mineral o cualquier otro tipo material desengrasante adecuado no reactivo antes de ser utilizados.

4.3.2.2. Moldeados de los cilindros.

Los especímenes de deben moldear rápidamente sobre una superficie rígida y nivelada, libre de vibración y de cualquier tipo de perturbación, en un lugar tan cerca como sea posible de la ubicación donde vayan a ser almacenados.

Para colocar el concreto dentro del molde se puede utilizar un cucharón o palustre despuntado. Mientras se coloca el concreto en el molde, se debe mover el cucharón alrededor del perímetro de la abertura del molde, para asegurar una distribución pareja del concreto con una segregación mínima. Cada capa de concreto debe ser consolidada como se requiere.

Todos los moldes se llenan uniformemente. Se coloca el concreto en el molde en el número de capas requeridas de aproximadamente igual volumen según lo indicado en la Tabla 13. Se procede a golpear cada capa uniformemente sobre la sección transversal con el extremo redondeado de la varilla con las características de la Tabla 14. La capa del fondo se apisona en toda su profundidad. Luego para cada capa que se va colocando, se deja que la varilla penetre aproximadamente 25 mm (1 pulgada) en la capa inferior. Después de apisonar cada capa, se golpea suavemente de 10 veces a 15 veces los bordes del molde con un martillo de caucho de peso aproximado de 0,6 kg con el fin de tapar cualquier orificio que haya quedado y sacar las burbujas de aire atrapadas.

El acabado de los cilindros se debe realizar del mismo modo y procurando la misma manipulación necesaria para producir una superficie uniforme, plana y nivelada con el borde o canto del molde y que no tenga depresiones o protuberancias mayores a 3,3 mm (1/8 pulg.).

Tabla 13.

Requisito de tamaño, tipo y moldeado

Tipo y tamaño del espécimen, profundidad (mm)	Método de compactación	Número de capas	Profundidad aproximada de capa (mm)
Cilindros:			
300 o menos	Apisonamiento	3 iguales	100 o menos
Más de 300	Apisonamiento	Las que se requieran	100 o menos
300 o menos	Vibración	2 iguales	150 o menos
300 a 450	Vibración	2 iguales	Medida profundidad del espécimen
más de 450	Vibración	3 o más	
Vigas:			
150 a 200	Apisonamiento	2 iguales	Profundidad media del espécimen
Más de 200	Apisonamiento	3 o más	100
150 a 200	Vibración	1	Profundidad del espécimen
Más de 200	Vibración	2 o más	200 lo más cerca posible

Fuente: (NTC550, 2000)

Tabla 14.

Requisitos para varillas compactadoras

Diámetro del cilindro, mm	Diámetro de la varilla		
	Diámetro de la varilla, mm	Longitud de la varilla, mm	Número de golpes/capa
< 150	10	300	25
150	16	600	25
200	16	600	50
250 o mayores	16	600	75

Fuente: (NTC550, 2000)

4.3.2.3. Remoción de los moldes y curado.

Una vez cumplidas las 24 ± 8 horas luego de moldeados los cilindros, se procede a su desencofrado, y luego se realiza un procedimiento de inmersión ideal para mantener los cilindros de concreto saturado, de manera que se promueva la hidratación de todas las partículas de cemento.

Se debe tener mucho cuidado en el manejo de los cilindros de concreto. Antes de transportar los cilindros estos deben ser curados y protegidos como se indica en las normas antes citadas. Durante el transporte, los especímenes se deben proteger con un material amortiguador para evitar daños por golpes, por temperaturas de congelación, o por pérdida de humedad. La pérdida excesiva de humedad se evita envolviendo los especímenes muy bien en plástico o rodeándolos de arena húmeda u aserrín húmedo. El tiempo de transporte no debe ser superior a 4 horas.

Los especímenes no se deben exponer al goteo o a corrientes de agua durante el proceso de curado. Los requisitos de curado para los tanques de almacenamiento de agua, cuartos y cabinas húmedas se presentan en la NTC 3512: 2009 (ASTM C 511, 2019).

4.3.3. Método de ensayo de resistencia a la compresión

El método de ensayo se realiza de acuerdo a lo indicado en la norma (ASTM C 39/39M, 2017) para la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes de concreto. Este método se encuentra limitado al concreto que tiene una masa unitaria mayor que 800 kg/m^3 .

4.3.3.1. Resumen del método de ensayo.

Este método consiste en la aplicación de una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad de carga determinado 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 entre el área de la sección transversal del espécimen.

4.3.3.2. Significado y uso.

La norma advierte que se debe tener cuidado en la interpretación del significado de las determinaciones de resistencia a la compresión por este método de ensayo, teniendo en cuenta que la resistencia no es una propiedad fundamental o intrínseca del concreto elaborados de determinados materiales. Los valores obtenidos dependerán del tamaño y la forma del espécimen, la dosificación, procedimientos de mezclado, los métodos de muestreo, moldeo, fabricación y de la edad, temperatura, y las condiciones de humedad durante el curado.

Los resultados de este método de ensayo son utilizados como base para el control de calidad de las operaciones de dosificación, mezclado, y colocación del concreto; determinación del cumplimiento de las especificaciones; control para la evaluación de la efectividad de aditivo; y usos similares.

4.3.3.3. Equipo.

La máquina de ensayo deber ser del tipo que tenga la suficiente capacidad de carga y que reúna las condiciones que permita proveer las velocidades de carga de aplicación en forma continua y sin impacto. La norma indica que la carga debe aplicarse a una velocidad de movimiento (media desde la platina a la cruceta) comprendida en el rango de $0,25 \pm 0,005$ MPa/s. La velocidad escogida se debe mantener, al menos, durante la segunda mitad del ciclo de ensayo, para la fase de carga prevista. Sin embargo, no se deberá ajustar la velocidad de movimiento a medida que se está alcanzando la carga última y la tasa de aplicación de carga decrece debido al agrietamiento del cilindro.

Durante la aplicación de la primera mitad de la fase de carga prevista, se permite una velocidad de carga mayor, siempre que esta se controle para evitar cargas por impacto.

4.3.3.4. Especímenes.

A continuación se relacionan algunas recomendaciones de la Norma ASTM C 39/39M-17 que deben tenerse en cuenta en la revisión de los especímenes que van a ser ensayados, con el fin de mantener la fiabilidad de los resultados del procedimiento:

- Las muestras no se deben ensayar si cualquier diámetro individual de un cilindro difiere de cualquier otro diámetro del mismo cilindro en más de 2%.
- ningún extremo de los especímenes de ensayo debe apartarse de la perpendicularidad a los ejes en más de 0.5 grados (aproximadamente equivalente a 1 mm en 100 mm (0.12 pulg en 12 pulg). Los extremos de los especímenes de ensayo a compresión que no sean planos dentro de 0.050 mm (0.002 pulg) deben ser aserrados o esmerilados para cumplir con la tolerancia, o nivelados de acuerdo tanto con la norma NTC 504:1995 (ASTM C 617/617M-87), y cuando se permita, con la norma NTC 3708:2010 (ASTM C 1231/1231M-93). El diámetro usado para calcular la sección transversal del espécimen de ensayo debe ser determinado al 0.25 mm (0.01 pulg) más cercano, promediando dos diámetros medidos en ángulos rectos uno del otro a la altura media del espécimen.
- El número individual de cilindros medidos para la determinación del diámetro promedio se puede reducir a uno por cada diez especímenes o tres especímenes por día, lo que sea mayor, si se sabe que todos los cilindros han sido hechos con un único lote de moldes reutilizables que consistentemente producen especímenes de diámetro promedio en una variación de 0.50 mm (0.02"). Cuando el diámetro promedio con un rango de variación de 0.50 mm o cuando los cilindros no están hechos con un único lote de moldes, cada

cilindro ensayado se debe medir y el valor encontrado ser usado en los cálculos de la resistencia a la compresión de cada muestra. Cuando los diámetros son medidos con frecuencia reducida, el área de los cilindros ensayados en un determinado día se calculará como el promedio de la de los tres (3) o más cilindros que representan el grupo ensayado dicho día.

4.3.3.5. Procedimiento del ensayo.

Los ensayos de compresión de los especímenes siguiendo la norma ASTM C 39/39M-17 deben realizarse en el menor tiempo y tan pronto como sea práctico después de sacarlos del almacenamiento húmedo. Los especímenes de ensayo deben ser mantenidos húmedos por cualquier método conveniente durante el periodo entre que se sacan del almacenamiento húmedo y el ensayo. La norma precisa que den ser ensayados en condición húmeda.

Todos los especímenes de una edad determinada, se deben romper dentro de las tolerancias de tiempo admisibles, indicadas a continuación:

Tabla 15.

Edades de ensayo y tolerancias admisibles

Edad del Ensayo	Tolerancia Permisible
12 horas	± 0,25 horas
24 horas	± 0,5 horas
3 días	± 2 horas
7 días	± 6 horas
28 días	± 20 horas
56 días	± 40 horas
90 días	± 2 días

Fuente: Norma ASTM C 39/39M-17

5. Desarrollo experimental

La presente investigación se realizó siguiendo una metodología experimental teniendo en cuenta los procedimientos en las Normas antes citadas para el cumplimiento de las etapas que se describen a continuación:

5.1. Ensayos de materiales.

5.1.1. Cemento.

El cemento utilizado para la elaboración de las mezclas de concreto para el moldeado de especímenes fue el cemento Portland tipo I, marca Argos. Las especificaciones de uso de este tipo de cemento indican la producción de concretos para cimentaciones, muros, contenciones, estructuras, morteros de mampostería. Así mismo, indica dentro de sus propiedades el desarrollo de resistencias requeridas tanto a edades tempranas como a edades finales.

Tabla 16.

Especificaciones técnicas del cemento gris de uso general utilizado

PARÁMETROS QUÍMICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 321 Tipo I	ASTM C-1157 TIPO GU.
Óxido de magnesio, MgO, máximo (%)	6.00	7.00	-
Trióxido de azufre, SO ₃ , máximo (%)	3.50	3.50	-
PARÁMETROS FÍSICOS	ESPECIFICACIONES ARGOS	NTC 121 Tipo I	ASTM C-1157 TIPO GU.
Fraguado inicial ⁽¹⁾ , mínimo (minutos)	45	45	45
Fraguado final ⁽¹⁾ , máximo (minutos)	420	480	420
Expansión autoclave, máximo (%)	0.8	0.8	0.8
Expansión en agua ⁽²⁾ , máximo (%)	0.02	-	0.02
Resistencia a 3 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	9.0	8.0	13.0
Resistencia a 7 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	16.0	15.0	20.0
Resistencia a 28 días ⁽³⁾ , mínimo (Mpa)	26.0	24.0	28.0
Blaine, mínimo (cm ³ /gr)	2800	2800	-

Fuente: Ficha técnica Cementos Argos, 2017

5.1.2. Agua.

El agua utilizada fue proveniente del acueducto del municipio de Magangué, Bolívar, Colombia. Este es un componente fundamental en la mezcla de concreto de cuyos requisitos generales se guía por la Norma NTC 3459: 2001 en la que se indica que 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 produzcan color, olor o sabor inusuales, objetables o que causen sospecha, el agua no se debe usar a menos que exista registros de concretos elaborados con ésta, o información que indique que no perjudica la calidad del concreto.



Figura 1. Agua del acueducto de Magangué utilizada para la elaboración de concreto

Fuente: Elaboración propia

5.1.3. Arena.

La arena utilizada para la elaboración de mezclas la elaboración de las mezclas de concreto para el moldeado de especímenes fue proveniente de canteras ubicadas en la ciudad de Valledupar, Cesar, Colombia.

La caracterización de la arena contempló la realización de los ensayos establecidos en la Norma ASTM C33/C33M-18 que define las especificaciones de agregados para concreto y las Normas citadas en la misma. Dentro de las principales características de la arena se encuentra la granulometría, que es una de las características que incide significativamente en el contenido de cemento que se requiere para alcanzar una resistencia determinada de una mezcla de concreto. En los anexos se incluyen todos los ensayos de caracterización físico-mecánicas realizados al agregado



Figura 2. Arena utilizada para la elaboración de concreto

Fuente: Elaboración propia

5.1.3.1. Granulometría de la arena.

Para los ensayos para determinar la gradación de la arena se siguió lo indicado en INV E 213-2013, NTC-77: 2007.

5.1.4. Grava.

La grava utilizada para la elaboración de mezclas la elaboración de las mezclas de concreto para el moldeado de especímenes fue proveniente de canteras ubicadas en el municipio de Tolú,

Córdoba, Colombia. Se utilizaron lotes con composición de tamaño máximo nominal del agregado de $\frac{3}{4}$ " y 1".

Al igual que para la arena, la caracterización de la grava contempló la realización de los ensayos establecidos en la Norma ASTM C33/C33M-18 que define las especificaciones de agregados para concreto y las Normas citadas en la misma. Dentro de las principales características de la grava se encuentra la granulometría, que es una de las características en las que se establece el tamaño máximo nominal de las partículas que lo componen y que incide significativamente en el contenido de cemento que se requiere para alcanzar una resistencia determinada de una mezcla de concreto. En los anexos se incluyen todos los ensayos de caracterización físico-mecánicos realizados al agregado.



Figura 3. Grava de TMN $\frac{3}{4}$ " y 1" utilizada para la elaboración de concreto

Fuente: Elaboración propia

5.1.4.1. Granulometría de la grava.

Para los ensayos para determinar la gradación de la grava se siguió lo indicado en INV E 213-2013, NTC 77: 2007. Se utilizaron dos lotes de grava con tamaño Máximo Nominal (TMN) de $\frac{3}{4}$ " y 1".

5.2. Aplicación de método para la dosificación de mezclas de concreto.

El método aplicado para la dosificación de la mezcla es el descrito en la norma (ACI 211.2, 1998) el cual fue descrito anteriormente.

Para lograr mezclas con valores de resistencias en los rangos de 21 MPa y 24.5 MPa se establecieron diseños de mezclas el lote único de arena y los lotes de grava de tamaño máximo nominal de 3/4" y 1".

A continuación, se muestra las dosificaciones para las dos tipos de mezclas elaboradas:

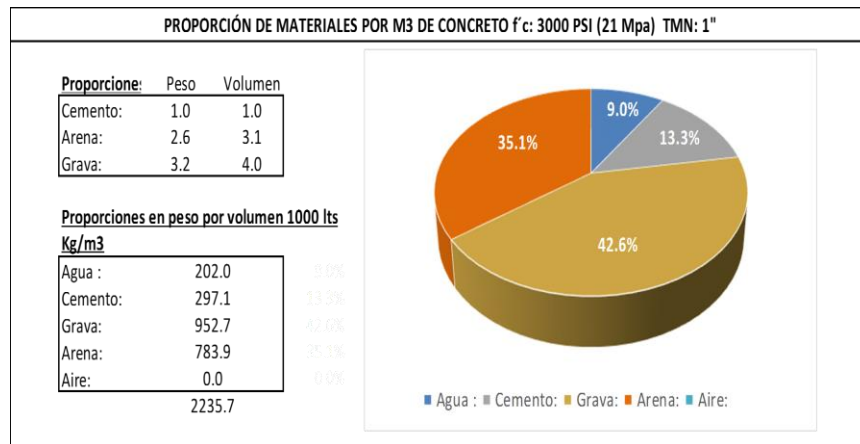


Figura 4. Proporciones de la dosificación en la mezcla f'c 21 MPa TMN 1"

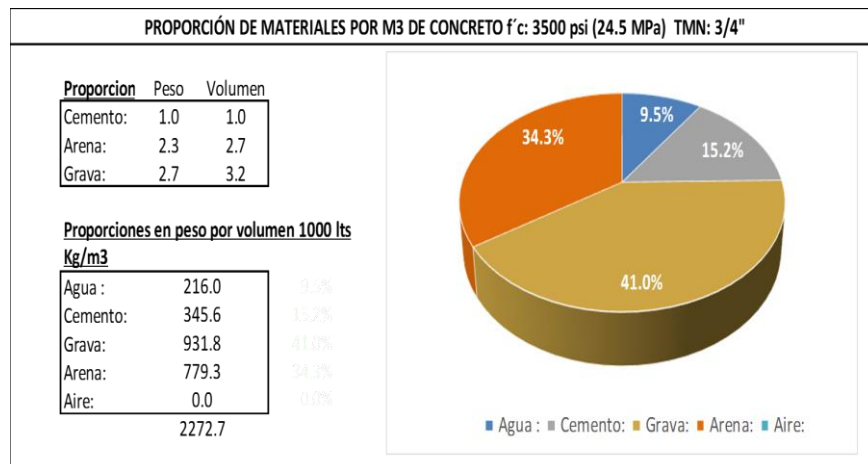


Figura 5. Proporciones de la dosificación en la mezcla f'c 24.5 MPa TMN 3/4"

5.3. Elaboración de especímenes y ensayos de resistencia a la compresión.

Para la elaboración de especímenes se siguió lo descrito anteriormente en el diseño metodológico, en atención a los requerimientos de la Norma NTC 550: 2000, que es equivalente a la ASTM C 31/C31M-09.

El mezclado del concreto se realizó con la ayuda de una mezcladora mecánica y con los implementos que permitieran el control volumétrico y en peso de los materiales utilizados.

Tabla 17.

Tamaño de la muestra por clase de mezcla

Día de elaboración (dd/mm/aaaa)	Resistencia psi	TMN	Cantidad Cilindros 150 x 300 mm	Cantidad Cilindros 100 x 200 mm	Numeración 150 x 300 mm	Numeración 100 x 200 mm	Cantidad concreto (M3)
30/04/2019	3500	3/4"	20	30	1 - 20	1 - 30	0.153
01/05/2019	3000	1"	20	30	21 - 40	31 - 60	0.153
Total (und):			40	60	Total (m3):		0.306

Fuente: Elaboración propia



Figura 6. Equipo de mezclado mecánico

Fuente: Elaboración propia

5.3.1. Elaboración de especímenes.

Luego de elaborada la mezcla se procedió a tomar la medida del asentamiento, determinando que se encontrara en un rango cercano al establecido en el diseño y que permitiera una manejabilidad adecuada. Seguidamente, se continuó con el proceso de toma de cilindros en tamaños de diámetro de 100 mm y 150 mm.



Figura 7. Control de asentamiento

Fuente: Elaboración propia



Figura 8. Moldes cilíndricos de 100 x 200 y 150 x 300 mm

Fuente: Elaboración propia



Figura 9. Compactación del concreto

Fuente: Elaboración propia



Figura 10. Acabado de cilindros

Fuente: Elaboración propia

5.3.2. Desencofrado y curado de especímenes.

Luego de cumplidas las 24 horas después del moldeado de los cilindros se procedió a su desencofrado, marcado y luego se realizó el procedimiento de inmersión en una pileta para mantener los cilindros de concreto saturado, de manera que se promueva la hidratación de todas las partículas de cemento.



Figura 11. Curado de especímenes antes del desencofre

Fuente: Elaboración propia



Figura 12. Marcado individual de especímenes

Fuente: Elaboración propia



Figura 13. Sitio de curado de especímenes

Fuente: Elaboración propia



Figura 14. Disposición de especímenes en sitio de curado

Fuente: Elaboración propia



Figura 15. Máquina de ensayo de resistencia a la compresión

Fuente: Elaboración propia

5.3.3. Ensayo de rotura de cilindros.

Los ensayos de compresión de los especímenes se realizaron siguiendo la norma ASTM C 39/39M-17 luego de sacarlos del almacenamiento húmedo. Los especímenes de ensayo se mantuvieron húmedos durante el periodo entre que se sacan del almacenamiento húmedo y el ensayo. La máquina de ensayo fue facilitada por una empresa de Interventoría de obra ubicada en el municipio de Magangué, Bolívar.

6. Resultados

6.1. Caracterización de materiales.

6.1.1. Granulometría de la arena.

La granulometría de la arena se realizó siguiendo las indicaciones de en sayo establecidas en la Norma ASTM C33/C33M-18 que define las especificaciones de agregados para concreto. La norma cita que no debe tener más de 45% de porcentaje que pase cualquier tamiz y que su módulo de finura no sea menor de 2,3 ni mayor de 3,1. Así mismo, se debe tener en cuenta que su distribución granulométrica se encuentre en los rangos antes citados en el capítulo 5.1.3.1. siguiendo lo indicado en la norma INV E 213-2013.

Tabla 18.

Especificación granulométrica de la arena según INV E 213-2013

PESOS: TAMIZ Pulg	INICIAL: mm	1144,6		FINAL: 1144,6		ESPECIFICACION	
		PESO RETEN.	% RETEN.	% RET.ACUMULADO	% PASA	INFER.	SUPER.
3,0"	76,200	0,0	0,00	0,00	100,00	100,0	100,0
2,0"	50,800	0,0	0,00	0,00	100,00	100,0	100,0
1,1/2"	38,100	0,0	0,00	0,00	100,00	100,0	100,0
1,0"	25,400	0,0	0,00	0,00	100,00	100,0	100,0
3/4"	19,050	0,0	0,00	0,00	100,00	100,0	100,0
1/2"	12,700	0,0	0,00	0,00	100,00	100,0	100,0
3/8"	9,525	0	0,00	0,00	100,00	100,0	100,0
Nº 4	4,750	22,8	1,99	1,99	98,01	95,0	100
Nº 8	2,360	53,4	4,67	6,66	93,34	80,0	100
Nº 16	1,180	175	15,29	21,95	78,05	50,0	85
Nº 30	0,600	410,1	35,83	57,77	42,23	25,0	60
Nº 50	0,300	283,2	24,74	82,51	17,49	10,0	30
Nº 100	0,150	151,9	13,27	95,78	4,22	2,0	10
Nº 200	0,075	48,2	4,21	100,00	0,00	0,0	0
Psa ·200	0,075	0,0	0,00	100,00	0,00	0,0	0,0

Fuente: Elaboración propia

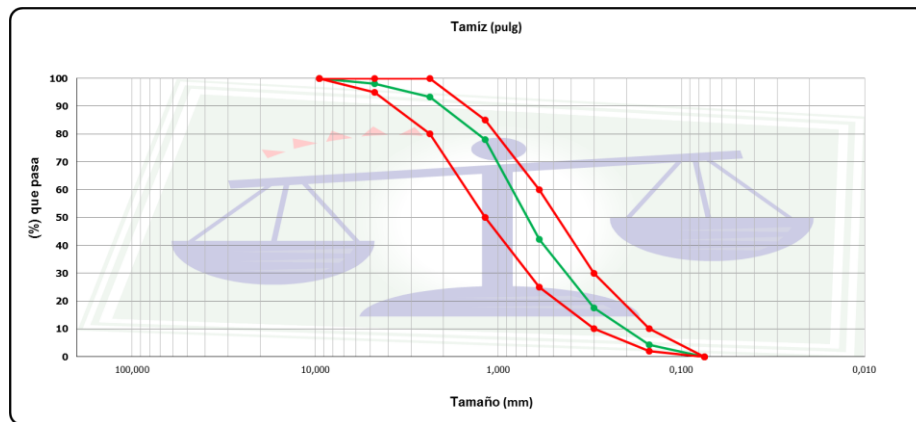


Figura 16. Curva granulométrica de la arena

Fuente: Elaboración propia

6.1.2. Granulometría de la grava.

La granulometría de la grava se realizó siguiendo las indicaciones de en sayo establecidas en la Norma ASTM C33/C33M-18 que define las especificaciones de agregados para concreto. Se tuvo en cuenta que su distribución granulométrica se encuentre en los rangos antes citados en el capítulo 5.1.3.1. y características según lo indicado en INV E 213-2013 Dentro de las características de la grava se encuentra el Tamaño Máximo Nominal definido por la Norma NTC 550: 2000, como la menor abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15%.

A continuación se muestran los cuadros y gráficas de resultados de las granulometrías realizadas a los lotes de gravas utilizados de TMN $\frac{3}{4}$ " y 1".

- Granulometría grava de TMN 3/4”.

Tabla 19.

Especificación granulométrica de la grava TMN 3/4” según INV E 213-2013 franja N°67

PESOS:		INICIAL:	6386,5	FINAL:		6386,5	ESPECIFICACION	
TAMIZ		PESO RETEN.	% RETEN.	% RET.ACUMULADO	% PASA	INFER.	SUPER.	
Pulg	mm							
3,0"	76,200	0,0	0,00	0,00	100,00	100,0	100,0	
2,0"	50,800	0,0	0,00	0,00	100,00	100,0	100,0	
1,1/2"	38,100	0,0	0,00	0,00	100,00	100,0	100,0	
1,0"	25,400	0,0	0,00	0,00	100,00	100,0	100,0	
3/4"	19,050	532,7	8,34	8,34	91,66	90,0	100,0	
1/2"	12,700	2313,5	36,22	44,57	55,43			
3/8"	9,525	1377,7	21,57	66,14	33,86	20,0	55,0	
Nº 4	4,750	2032,2	31,82	97,96	2,04	0,0	10,0	
Nº 8	2,360	130,4	2,04	100,00	0,00	0,0	5,0	
Nº 16	1,180	0	0,00	100,00	0,00	0,0	0,0	
Nº 30	0,600	0	0,00	100,00	0,00	0,0	0,0	
Nº 50	0,300	0	0,00	100,00	0,00	0,0	0,0	
Nº 100	0,150	0,0	0,00	100,00	0,00	0,0	0,0	
Nº 200	0,075	0	0,00	100,00	0,00	0,0	0,0	
Psa -200	0,075	0,0	0,00	100,00	0,00			

Fuente: Elaboración propia

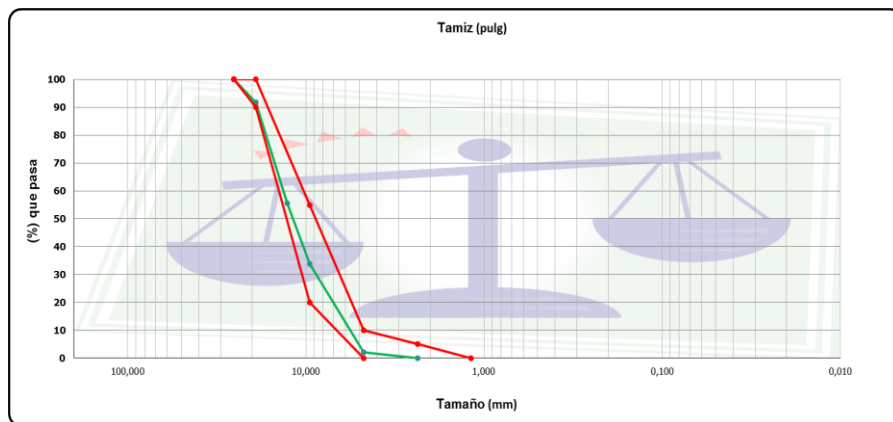


Figura 17. Curva granulométrica la grava TMN 3/4"

Fuente: Elaboración propia

- Granulometría grava TMN 1”.

Tabla 20.

Especificación granulométrica de la grava TMN 1” según INV E 213-2013 franja N°57

PESOS:	TAMIZ	INICIAL:	9347.7	FINAL:	9347.7	ESPECIFICACION		
						PESO RETEN.	% RETEN.	% RET. ACUMUL.
	Pulg	mm						
	3,0"	76.200	0	0	0	100.00	100.0	100.0
	2,0"	50.800	0	0	0	100.00	100.0	100.0
	1,1/2"	38.100	0	0.00	0.00	100.00	100.0	100.0
	1,0"	25.400	399.4	4.27	4.27	95.73	95.0	100.0
	3/4"	19.050	2149.1	22.99	27.26	72.74		
	1/2"	12.700	3029.5	32.41	59.67	40.33	25.0	60.0
	3/8"	9.525	887.5	9.49	69.17	30.83		
	Nª 4	4.750	2552.4	27.31	96.47	3.53	0.0	10.0
	Nª 8	2.360	329.8	3.53	100.00	0.00	0.0	5.0
	Nª 16	1.180	0	0.00	100.00	0.00	0.0	0.0
	Nª 30	0.600	0	0.00	100.00	0.00	0.0	0.0
	Nª 50	0.300	0	0.00	100.00	0.00	0.0	0.0
	Nª 100	0.150	0.0	0.00	100.00	0.00	0.0	0.0
	Nª 200	0.075	0	0.00	100.00	0.00	0.0	0.0
	Psa -200	0.075	0.0	0.00	100.00	0.00		

Fuente: Elaboración propia

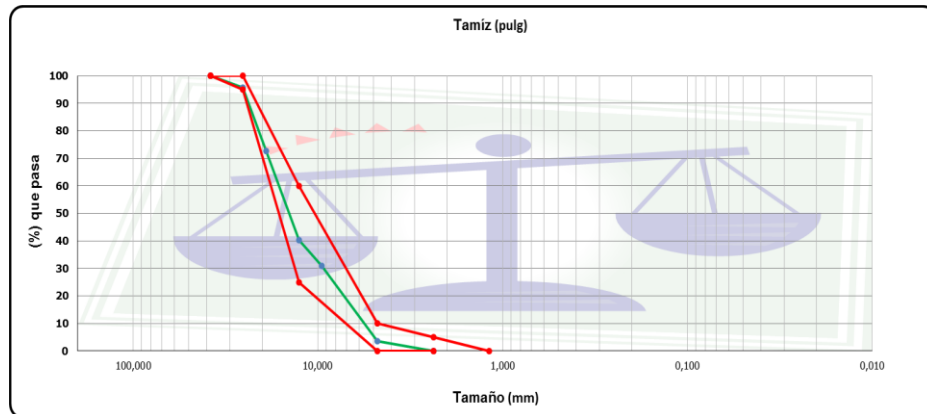


Figura 18. Curva granulométrica la grava TMN 1"

Fuente: Elaboración propia

6.2. Resultados de los ensayos de resistencia a la compresión del concreto a los 28 días

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la realización de los ensayos de resistencia a la compresión de los cilindros de 100 mm y 150 mm tomados a mezclas de $f'c$ 3000 psi y $f'c$ 3500 psi indicando los datos del número de identificación del cilindro, ubicación del concreto representado por la muestra, fecha de toma y rotura de la muestra y el resultado de la resistencia a los 28 días.

- Resultados de ensayos de resistencia a la compresión de especímenes de 150 mm de diámetro, tomadas a la mezcla de 3000 psi con TMN de 1".

Tabla 21.

Resultado de ensayos mezcla $f'c$: 21 MPa TMN 1" en cilindros 150 x 300 mm

CILINDRO (N°)	ENSAYO	CARGA (KN)	CARGA (MPa)	$f'c$ (psi)	$f'c$ (MPa)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Rango (MPa)
1	1	386.10	21.27	3045	21.32	21.36	21.27	0.09
2		387.65	21.36					
3	2	360.43	19.86	2940	20.58	21.30	19.86	1.44
4		386.60	21.30					
5	3	383.36	21.12	3011	21.08	21.12	21.04	0.08
6		381.85	21.04					
7	4	375.95	20.71	3004	21.03	21.35	20.71	0.64
8		387.49	21.35					
9	5	388.32	21.40	3042	21.30	21.40	21.19	0.21
10		384.66	21.19					
11	6	382.88	21.10	3031	21.22	21.33	21.10	0.23
12		387.21	21.33					
13	7	381.06	20.99	3049	21.35	21.70	20.99	0.71
14		393.85	21.70					
15	8	384.58	21.19	3102	21.72	22.24	21.19	1.05
16		403.67	22.24					
17	9	377.87	20.81	3001	21.01	21.20	20.81	0.39
18		384.76	21.20					
19	10	371.70	20.48	2896	20.28	20.48	20.07	0.41
20		364.30	20.07					
PROMEDIO GENERAL (\bar{X}):						21.1	MPa	
VALOR MÁXIMO:						21.7	MPa	
VALOR MÍNIMO:						20.3	MPa	
RANGO PROMEDIO (\bar{R}):						0.5	MPa	
DESVIACIÓN ESTANDAR DENTRO DE LA PRUEBA (s_1):						0.47	MPa	
COEFICIENTE DE VARIACIÓN DENTRO DE LA PRUEBA (V_1):						2.21%		
NÚMERO DE ENSAYOS INDIVIDUALES (N):						20		

Nota: Cilindros elaborados para un $f'c$ de 21 MPa, con diámetro promedio de 152 mm y ensayados a los 28 días.

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de ensayos de resistencia a la compresión de especímenes de 100 mm de diámetro, tomadas a la mezcla de 3000 psi con TMN de 1”.

Tabla 22.

Resultado de ensayos mezcla $f'c$: 21 MPa TMN 1" en cilindros 100 x 200 mm

CILINDRO (N°)	ENSAYO	CARGA (KN)	CARGA (MPa)	$f'c$ (psi)	$f'c$ (MPa)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Rango (MPa)
1		178.35	21.09					
2	1	163.90	20.65	2782	19.47	21.09	16.68	4.41
3		136.36	16.68					
4		168.30	20.59					
5	2	167.43	20.49	3012	21.08	22.17	20.49	1.68
6		181.16	22.17					
7		175.40	21.46					
8	3	167.24	20.46	3007	21.05	21.46	20.46	1.00
9		173.43	21.22					
10		167.12	20.45					
11	4	170.38	20.85	2994	20.96	21.58	20.45	1.13
12		176.40	21.58					
13		185.01	22.64					
14	5	175.43	21.47	3171	22.20	22.64	21.47	1.17
15		183.73	22.48					
16		142.79	17.47					
17	6	182.08	22.28	2877	20.14	22.28	17.47	4.81
18		168.97	20.67					
19		156.60	19.16					
20	7	173.04	21.17	2851	19.96	21.17	19.16	2.01
21		159.72	19.54					
22		149.40	18.28					
23	8	158.25	19.36	2830	19.81	21.80	18.28	3.52
24		178.19	21.80					
25		167.39	20.48					
26	9	170.26	20.83	2963	20.74	20.92	20.48	0.44
27		170.99	20.92					
28		172.09	21.06					
29	10	170.68	20.88	2980	20.86	21.06	20.63	0.43
30		168.57	20.63					
PROMEDIO GENERAL (\bar{X}):							20.6	MPa
VALOR MÁXIMO:							22.2	MPa
VALOR MÍNIMO:							19.5	MPa
RANGO PROMEDIO (\bar{R}):							2.1	MPa
DESVIACIÓN ESTANDAR DENTRO DE LA PRUEBA (s_1):							1.22	MPa
COEFICIENTE DE VARIACIÓN DENTRO DE LA PRUEBA (V_1):							5.90%	
NÚMERO DE ENSAYOS INDIVIDUALES (N):							30	

Nota: Cilindros elaborados para un $f'c$ de 21 MPa, con diámetro promedio de 102 mm y ensayados a los 28 días.

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de ensayos de resistencia a la compresión de especímenes de 150 mm de diámetro, tomadas a la mezcla de 3500 psi con TMN de 3/4".

Tabla 23.

Resultado de ensayos mezcla f'c: 24.5 MPa TMN 3/4" en cilindros 150 x 300 mm

CILINDRO (N°)	ENSAYO	CARGA (KN)	CARGA (MPa)	f'c (psi)	f'c (MPa)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Rango (MPa)
1	1	431.30	23.76	3416	23.92	24.07	23.76	0.31
2		436.88	24.07					
3	2	403.85	22.25	3312	23.19	24.12	22.25	1.87
4		437.98	24.12					
5	3	412.57	22.73	3385	23.70	24.66	22.73	1.93
6		447.57	24.66					
7	4	434.29	23.93	3439	24.07	24.21	23.93	0.28
8		439.45	24.21					
9	5	430.04	23.69	3343	23.40	23.69	23.11	0.58
10		419.41	23.11					
11	6	432.08	23.81	3418	23.93	24.04	23.81	0.23
12		436.36	24.04					
13	7	434.33	23.93	3441	24.09	24.25	23.93	0.32
14		440.06	24.25					
15	8	436.29	24.04	3473	24.31	24.58	24.04	0.54
16		446.19	24.58					
17	9	442.75	24.39	3482	24.38	24.39	24.36	0.03
18		442.14	24.36					
19	10	409.78	22.58	3368	23.58	24.57	22.58	1.99
20		445.99	24.57					

PROMEDIO GENERAL (\bar{X}):	23.9	MPa
VALOR MÁXIMO:	24.4	MPa
VALOR MÍNIMO:	23.2	MPa
RANGO PROMEDIO (\bar{R}):	0.8	MPa
DESVIACIÓN ESTANDAR DENTRO DE LA PRUEBA (s_1):	0.72	MPa
COEFICIENTE DE VARIACIÓN DENTRO DE LA PRUEBA (V_1):	3.00%	
NÚMERO DE ENSAYOS INDIVIDUALES (N):	20	

Nota: Cilindros elaborados para un f'c de 24.5 MPa, con diámetro promedio de 152 mm y ensayados a los 28 días.

Fuente: Elaboración propia

- Resultados de ensayos de resistencia a la compresión de especímenes de 100 mm de diámetro, tomadas a la mezcla de 3500 PSI con TMN de 3/4".

Tabla 24.

Resultado de ensayos mezcla f'c: 24,5 MPa TMN 3/4" en cilindros 100 x 200 mm

CILINDRO (N°)	ENSAYO	CARGA (KN)	CARGA (MPa)	f'c (psi)	f'c (MPa)	Máximo (MPa)	Mínimo (MPa)	Rango (MPa)
1		190.12	23.26					
2	1	206.01	25.21	3465	24.26	25.21	23.26	1.95
3		198.02	24.30					
4		210.50	25.76					
5	2	203.96	24.93	3586	25.10	25.76	24.62	1.14
6		201.21	24.62					
7		213.05	26.07					
8	3	198.05	24.33	3621	25.35	26.07	24.33	1.74
9		209.59	25.65					
10		198.78	24.32					
11	4	185.76	22.73	3471	24.30	25.84	22.73	3.11
12		211.15	25.84					
13		201.07	24.60					
14	5	204.93	25.08	3523	24.66	25.08	24.30	0.78
15		198.56	24.30					
16		201.39	24.64					
17	6	200.10	24.01	3517	24.62	25.20	24.01	1.19
18		205.97	25.20					
19		204.59	25.03					
20	7	199.50	24.41	3521	24.65	25.03	24.41	0.62
21		200.30	24.51					
22		183.46	22.45					
23	8	197.81	24.20	3398	23.78	24.70	22.45	2.25
24		201.88	24.70					
25		193.23	23.64					
26	9	194.69	23.82	3409	23.86	24.13	23.64	0.49
27		197.18	24.13					
28		201.63	24.67					
29	10	186.47	22.82	3402	23.81	24.67	22.82	1.85
30		195.77	23.95					
PROMEDIO GENERAL (\bar{X}):							24.4	MPa
VALOR MÁXIMO:							25.4	MPa
VALOR MÍNIMO:							23.8	MPa
RANGO PROMEDIO(\bar{R}):							1.5	MPa
DESVIACIÓN ESTANDAR DENTRO DE LA PRUEBA(S_1):							0.89	MPa
COEFICIENTE DE VARIACIÓN DENTRO DE LA PRUEBA(V_1):							3.65%	
NÚMERO DE ENSAYOS INDIVIDUALES (N):							30	

Nota: Cilindros elaborados para un f'c de 24.5 MPa, con diámetro promedio de 102 mm y ensayados a los 28 días.

Fuente: Elaboración propia

6.3. Análisis de parámetros estadísticos.

A continuación, se evalúan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión realizados a los especímenes cilíndricos de 100 x 200 mm como a los especímenes de 150 x 300 mm en forma individual, el análisis se lleva a cabo en base a la comparación de los resultados mostrados en el capítulo anterior en donde se diferencia la resistencia y el Tamaño Máximo Nominal de la grava.

A manera de ilustración los conceptos de cada uno de los parámetros estadísticos utilizados en la evaluación, a continuación se muestra el procedimiento seguido con el registro de los datos correspondiente a la producción del concreto de $f'c$ 24.5 MPa (3500 psi), para un Tamaño Máximo Nominal de $\frac{3}{4}$ " y en espécimen cilíndrico de 100 x 200 mm. Como se mencionó anteriormente, los parámetros estadísticos de evaluación dentro de la prueba son la desviación estándar y el coeficiente de variación.

Desviación estándar dentro de la prueba (S_1):

$$S_1 = \frac{1}{d_2} \bar{R} \quad (6)$$

$$S_1 = 0.5907 \times 1.5 = 0.89 \text{ MPa}$$

Coefficiente de variación dentro de la prueba (V_1):

$$V_1 = \frac{S_1 \times 100}{\bar{X}} \quad (7)$$

$$V_1 = \frac{0.89 \times 100}{24.4} = 3.65 \%$$

Según los resultados obtenidos para esta prueba se tiene un promedio de 24.4 MPa, lo cual es un valor muy cercano al promedio requerido de 25 MPa. Del mismo modo, una desviación estándar es 0.89 MPa y un coeficiente de variación de 3.65% muestran que el grado de control dentro de la prueba es bueno.

La tabla que se muestra a continuación contiene el resumen de los valores de los parámetros estadísticos para cada una de las pruebas realizadas.

Tabla 25.

Resumen de parámetros estadísticos para cada prueba

Resistencia $f'c$ (Mpa):	Mezcla			
	21 Mpa TMN 1"		24,5 Mpa TMN 3/4"	
Díametro espécimen (mm):	100	150	100	150
Promedio General \bar{X} (Mpa):	20,6	21,1	24,4	23,9
Rango promedio \bar{R} (Mpa):	2,1	0,5	1,5	0,8
Desviación estandar S_1 (Mpa):	1,2	0,5	0,9	0,7
Coeficiente de variación $V1$ (%):	5,9%	2,2%	3,7%	3,0%

Fuente: Elaboración propia.

Nótese que los mayores valores de desviación estándar y coeficiente de variación dentro de la prueba se presentan en la mezcla de 21 MPa, con TMN de 1” y en especímenes tomados en moldes de 100 mm de diámetro.

En línea con lo anterior, se comparan los valores de los parámetros estadísticos de cada una de las pruebas con la tabla (ACI E 704-4, 1974) que califica el grado de control existente para el caso de mezclas de prueba en laboratorio, obteniendo la siguiente calificación:

- Mezcla de 3000 psi TMN 1” en espécimen de 100 mm: **Pobre** (sobre 5)
- Mezcla de 3000 psi TMN 1” en espécimen de 150 mm: **Muy bueno** (de 2 a 3)
- Mezcla de 3500 psi TMN ¾” en espécimen de 100 mm: **Bueno** (de 3 a 4)

- Mezcla de 3500 psi TMN ¾” en espécimen de 150 mm: **Muy bueno** (de 2 a 3)

Adicionalmente a la calificación del gado de control existente en términos de la desviación estándar y del coeficiente de variación, se muestran a continuación los resultados expresados en forma gráfica, lo cual permite apreciar las medidas de dispersión de los resultados para cada una de las situaciones.



Figura 19. Gráfico de cajas y bigotes de resistencia vs clase de muestra

Fuente: Elaboración propia.

Mediante el gráfico de caja o bigote se tiene una manera conveniente de mostrar visualmente grupos de datos numéricos a través de sus cuartiles. En el mismo, se pueden observar las líneas que se extienden paralelas a las cajas se conocen como «bigotes», los cuales indican la variabilidad de los resultados por fuera de los cuartiles superior e inferior.

En el caso particular en estudio, se puede evidenciar como los resultados de los ensayos en la mezcla de 3000 psi con TMN 1”, en especímenes elaborados en cilindros de 100 mm de

diámetro, presentan una variabilidad muy alta en el cuartil inferior. Así mismo, se observa como la caja y los bigotes correspondientes a la mezcla de 3000 psi con TMN 1", en especímenes elaborados en cilindros de 150 mm de diámetro, presentan una menor variabilidad en los cuartiles superior e inferior.

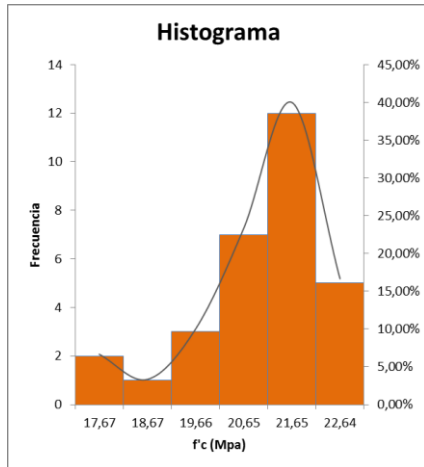
Otro aspecto importante que se puede observar en este gráfico es que la resistencia a la compresión obtenida en las muestras en mezcla de concretos tomadas en cilindros de 100 mm es superior 0.5 MPa a las resistencias de los cilindros de 150 mm para el caso de TMN ¾". Esta evaluación se resume en términos porcentuales con respecto al espécimen de 150 mm, tomado como patrón, en un 2.09% mayor al f'_c esperado.

Esta situación cambia en el caso de las muestras de concreto de TMN 1", en donde la resistencia a la compresión obtenida en cilindros de 100 mm es inferior en 0.5 MPa a las resistencias de los cilindros de 150 mm. Esta evaluación se resume en términos porcentuales con respecto al espécimen de 150 mm, tomado como patrón, en un 2.37% menor al f'_c esperado.

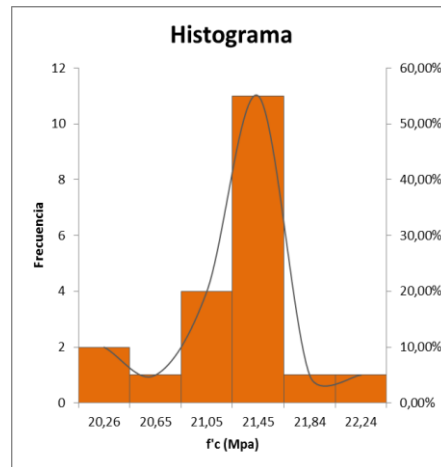
Teniendo en cuenta lo indicado en (NSR, 2010) acerca de la consideración satisfactoria de una clase determinada de concreto en cuanto a que ningún resultado del ensayo de resistencia debe ser menor a 3.5 MPa para f'_c 35 MPa o menor, se considera que la diferencia general mostrada (0.5 MPa) en los cilindros de 100 mm se encuentra en un rango aceptable.

Del mismo modo, mediante la representación gráfica con histogramas se agruparon los datos en clases de resistencia f'_c , y se muestra las observaciones de frecuencia absoluta para cada una de ellas. La representación de los intervalos de clase en el eje horizontal y las frecuencias en el eje vertical.

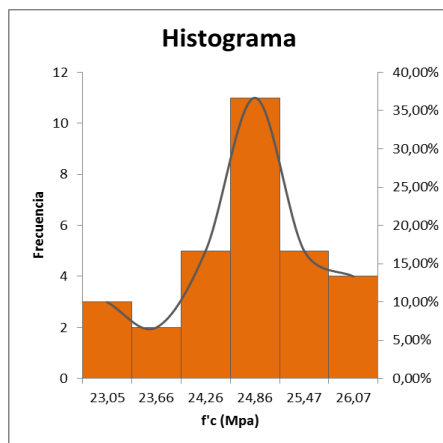
En el caso particular del Histograma de resultados de los ensayos en la mezcla de 3000 psi con TMN 1", en especímenes elaborados en cilindros de 100 mm, se observa una mayor frecuencia de resultados inferiores al promedio. La distribución tiene una frecuencia mejor distribuida para este mismo tamaño de cilindro en la mezcla elaborada con TMN 3/4".



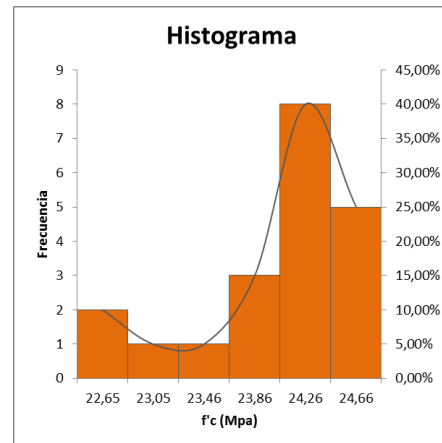
b) mezcla f'c 21 Mpa TMN 1'' cilindros 100 x 200 mm



a) mezcla f'c 21 Mpa TMN 1'' cilindros 150 x 300 mm



d) mezcla f'c 24.5 Mpa TMN 3/4'' cilindros 100 x 200 mm



c) mezcla f'c 24.5 Mpa TMN 3/4'' cilindros 150 x 300 mm

Figura 20. Gráficos de histograma de frecuencia de las resistencias obtenidas

Fuente: Elaboración propia.

6.4. Análisis basado en la revisión comparativa de la literatura previa.

A continuación, se realiza un análisis comparativo a partir de la revisión de la literatura previa relacionada con la presente investigación. Para tal fin, se presenta el contenido de la referencia bibliográfica que guarda mayor similitud en cuanto a diseño metodológico, seguido de los comentarios acorde a los resultados obtenidos.

- En la investigación realizada por (Barbosa Guzmán & Gallardo Eraso, 1997) , Resultados de resistencia a compresión del hormigón empleando cilindros de dimensiones no estandarizadas, se indica que “(...) *se observa además, que para las mezclas de concreto con agregado de TMN a $\frac{3}{4}$ ”*, las relaciones de resistencia son más cercanas a uno (1.0), que la de las mezclas con TMN 1” , es decir, que con los cilindros D10 y D7.5, se obtienen resistencias más parecidas a las del cilindro estándar utilizando TMN del agregado igual a $\frac{3}{4}$ ”(...”). En cursiva y subrayado fuera de texto.

Del mismo modo, se observa que “en la mayoría de las resistencias de los cilindros D15 (80%), la dispersión evaluada como coeficiente de variación es menor que la correspondiente a cilindros de D10 y D7.5, y está en un rango del 1.73% al 7.35%, mientras que la de los cilindros de D10 y D7.5 se encuentra en rangos del 2.16% al 13.46% y del 3.39% al 13.96%, respectivamente (...).” En cursiva y subrayado fuera de texto.

Respecto a los resultados del caso en estudio, se observa concordancia en cuanto a que los coeficientes de variación de la resistencia de mezclas elaboradas con grava de TMN $\frac{3}{4}$ ” y las elaboradas con TMN de 1” presentaron un aumento al disminuir el tamaño del cilindro de 150 mm a 100 mm. Así mismo, para el caso de mezclas elaboradas con

TMN $\frac{3}{4}$ ” los resultados de las resistencias guardan una mayor similitud en cuanto a magnitud y coeficiente de variación.

- Por otro lado, en la investigación realizada por (Aragón Matamoros & Navas Carro, 2012), Medición de la resistencia a la compresión del concreto mediante cilindros de 100 por 200 mm y de 150 por 300 mm para el control de calidad de las obras, se obtuvieron resultados que permitían indicar que *“En promedio los cilindros de 100 por 200 mm registraron una resistencia a la compresión un 9,98% mayor a la resistencia a la compresión registrada en los cilindros de 150 por 300 mm (...).La menor diferencia se presentó para la mezcla tipo A¹, a una edad de 7 días, con un tamaño máximo de agregado de 12,5 mm con una razón de resistencia $f'c_{100}/f'c_{150}$ de 1,06, mientras que la mayor razón de resistencia $f'c_{100}/f'c_{150}$ fue de 1,14, para la mezcla tipo A a los 7 días y con un tamaño máximo del agregado de 12,5 mm; la misma diferencia se presentó para la mezcla B² a una edad de 7 días y para un tamaño máximo de partículas de 25 mm(...).”*En cursiva y subrayado fuera de texto.

Así mismo, se presentan un cuadro resumen con los valores de los coeficientes de variación promedio obtenidos según la edad de los cilindros y su tamaño. En el mismo, se puede observar como para las diferentes edades de ensayo los coeficientes de variación son mayores para los cilindros de 100 mm de diámetro en comparación con los de 150 mm de diámetro: para ensayos a 7 días, 3.88 frente a 2.99; mientras que, para ensayos a 28 días, 3.05 frente a 2.71.

¹ Mezcla con diseño $f'c$ de 21 MPa, elaboradas para TMN de $\frac{3}{4}$ ” y 1”

² Mezcla con diseño $f'c$ de 35 Mpa, elaboradas para TMN de $\frac{3}{4}$ ” y 1”

En concordancia con los resultados del caso en estudio, se observa que los valores de los coeficientes de variación son mayores para los cilindros de 100 mm de diámetro en comparación con los de 150 mm de diámetro, tanto para el caso de mezclas elaboradas con grava de TMN $\frac{3}{4}$ ", como para mezclas elaboradas con grava de TMN 1". Del mismo modo, se advierte la coincidencia en que las resistencias promedio obtenidas en cilindros de 100 mm de diámetro son mayores para el caso de mezclas elaboradas con grava de TMN $\frac{3}{4}$ ".

- En línea con las referencias anteriores, se llama la atención en la coincidencia de la investigación realizada por (Zabihi, 2012), Effect of Specimen Size and Shape on Strength of Concrete, la cual indica en las conclusiones que "(...) *Los resultados de resistencia a la compresión fueron fuertemente influenciados por el tamaño de sus muestras (...)*".

Así mismo, se concluye que "*Para analizar muestras de concreto en el control de calidad de trabajos de hormigonado, los especímenes cilíndricos de 150 × 300 mm demuestran ser las muestras más confiables.*". En cursiva y subrayado fuera de texto.

7. Conclusiones

A continuación, se presentan las conclusiones de la investigación realizada a partir de la caracterización de los agregados gruesos y finos y de la evaluación de los resultados obtenidos de los ensayos realizados mediante procedimiento estandarizado de resistencia a la compresión del concreto:

- Los factores de correlación tienen un mayor nivel de confiabilidad cuando el tamaño máximo del agregado es menor y el diámetro es mayor. Los cilindros de 100 mm de diámetro son confiables para ensayos de resistencia a la compresión del concreto cuando el TMN del agregado grueso no excede de 1”.
- Los coeficientes de variación de la resistencia de mezclas elaboradas con grava de TMN $\frac{3}{4}$ ” y las elaboradas con TMN de 1” presentaron un aumento al disminuir el tamaño del cilindro. Es decir, el coeficiente de variación de las resistencias a la compresión del concreto aumenta cuando decrece la relación Diámetro del cilindro/ Tamaño máximo del agregado.
- Si bien los promedios de los resultados de ensayos de resistencia a la compresión del concreto en los especímenes de 100 mm y 150 mm de diámetro presentan una diferencia que no es significativa, el grado de confianza en cilindros de 100 mm de diámetro en mezclas elaboradas con TMN de 1” puede disminuir en el control del sistema de aseguramiento de la calidad
- Para ensayos de aceptación en el control de calidad del concreto se pueden utilizar los cilindros de 100 mm de diámetro, su coeficiente de variación se mantiene en márgenes aceptables cuando el TMN es igual a $\frac{3}{4}$ ”. Sin embargo, esta indicación estaría supeditada a lo recomendado en la Normatividad que indica que para el uso de cilindros más

pequeños que el patrón de 150 mm de diámetro se debe contar con los requerimientos de las especificaciones para cada proyecto.

- Se deben implementar metodologías para lograr la especificación en el proyecto del uso de cilindros de tamaño inferior al patrón de 150 mm de diámetro. Esto debe hacer parte de las medidas a implementar en mejora de los procedimientos para la elaboración y tratamiento de especímenes, así como en los métodos de ensayo de resistencia a la compresión del concreto.

Referencias

- AASHTO T 23. (n.d.). *Standard Method for Making and Curing Concrete Compressive and Flexural Strength Test Specimens in the Field*. American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ACI 211.2. (1998). *Standard Practice for Selecting Proportion for Structural Lightweight Concrete*. USA: American Concrete (ACI).
- ACI 214. (2011). *Evaluación of strength Test Results Concrete*. USA: American Concrete Institute (ACI).
- ACI 318-14. (2014). USA: American Concrete Institute.
- ACI E 704-4. (1974). *Control de Calidad del Concreto*. Instituto Mexicano del cemento y del concreto, A. C.
- Aragón Matamoros, J., & Navas Carro, A. (2012). Medición de la resistencia a la compresión. *Infraestructura Vial*, 13.
- Asocreto. (2003). *Manual de control de calidad del concreto en la obra*. Bogotá D.C.: D'VINNI.
- ASTM C 39/39M. (2017). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. ASTM International.
- ASTM C31/ C31M. (2009). *Standard test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. USA: ASTM.
- Barbosa Guzmán, E. A., & Gallardo Eraso, R. H. (1997). Resultados de resistencia a compresión del hormigón empleando cilindros de dimensiones no estandarizadas. *Ingeniería e Investigación*, 15.
- Bazant, Z. P., & Oh, B. (1984). *Crack band theory for fracture of concrete*. Master Struct.
- Bazant, Z. P., & Planas, J. (1998). *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. CRC Press LLC.

- Blanks, R., & McNamara, C. (1935). *Mass concrete test specimen in large cylinders. ACI J Proc* 1935;31(3):280-303.
- Cong Vu, C., Weiss, J., Plé, O., Amitrano, D., & Vandembroucq, D. (2018). Revisiting statistical size effects on compressive failure of heterogeneous materials, with a special focus on concrete. *Elsevier*, 24.
- Dehestani, M., Nikbin, I. M., & Asadollahi, S. (2014). *Effects of specimen shape and size on the compressive strength of self - consolidating concrete (SCC)*. Elsevier Ltd.
- del Viso, J. R., Carmona, J. R., & Ruiz, G. (2007). Shape and size effects on the compressive strength of high-strength concrete. *Elsiver*, 10.
- Douglas Fortstie, A., & Russell Schnormeier. (1979). New Arizona findings Four-by-eight test cylinders are big enough . *The Aberdeen Group*, 3.
- Gonnermann, H. (1925). *Effect of size and shape of test specimen on compressive strngth of concrete.Proc.*
- Gutiérrez De López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Il Sim, J., Hyeok Yang, K., & Kyu Jeon, J. (2013). Influence of aggregate size on the compressive size effect according. *ELSEVIER*, 10.
- Jihad Hamad, A. (2015). Size and shape effect of specimen on the compressive strength of HPLWFC reinforced with glass fibres. *Elsevier*, 8.
- Karamloo, M., Mazloom, M., & Payganeh, G. (2016). Effects of maximum aggregate size on fracture behaviors of self-compacting lightweight concrete. *ELSEVIER*.
- Malhotra, V. M. (1976). *Are 4 x 8 inch concrete cylinders as good as 6 x 12 inch cylinders for quality control concrete?* ACI J Proc.

- Mardani-Aghabaglou, A., Tuyan, M., Yılmaz, G., Arıöz, Ö., & Ramyar, K. (2013). Effect of different types of superplasticizers on fresh properties and strength of self-consolidating concrete. *Research Gate*, 8.
- Muciaccia, G., Rosati, G., & Di Luzio, G. (2017). Compressive failure and size effect in plain concrete cylindrical. *ELSEVIER*, 10.
- Neville, A. (2001). *Core tests: Easy to perform easy to interpret*. Concrete International.
- Neville, A. M. (1966). *A general relation for strength of concrete specimens of different shape and size*. J Am Concr Inst.
- NSR. (2010). *Título C Concreto estructural*. Asociación Colombiana de.
- NTC550. (2000). *Concretos. Elaboración y curado de especímenes de concreto en obra*. Santafé de Bogotá: ICONTEC.
- Osorio, J. D. (2003). *Control de calidad del concreto en la obra*. Santafe de Bogotá: ASOCRETO.
- Sabnis, G., & Mirza, S. (1979). Size effects in model concretes? *J Struct Div ASCE*.
- Sanchez de Guzmán, D. (1996). *Concretos y morteros certificados manejo y control en obra*. Santafé de Bogotá: Asocreto.
- Sanchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Santafé de Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana-Facultad de Ingeniería.
- Tokyay, M., & Ozdemir, M. (1997). *Specimen shape and size effect on the compressive strength concrete*. Cem Concr Res.
- Zabihi, N. (2012). *Effect of Specimen Size and Shape on Strength of concrete*. Famagusta.

Anexos