



Análisis técnico y experimental para la determinación de una mezcla de concreto que cumpla solicitaciones de carga del orden de 35 MPa

Yesica Astrid Marín Alvis

Informe de práctica para optar al título de Ingeniero Civil

Asesores

Juan Guillermo Jaramillo Gaviria, Ingeniero Civil

Karen Vanessa Henao Garcés, Ingeniera Civil

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Civil

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

Cita	(Marín Alvis, 2022)
Referencia	Marín Alvis, Y.A. (2022). <i>Análisis técnico y experimental para la determinación de una mezcla de concreto que cumpla solicitaciones de carga del orden de 35MPa</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2020)	



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano: Jesús Francisco Vargas Bonilla

Jefe departamento: Diana Catalina Rodríguez Loaiza

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

Contenido

Resumen	7
1. Introducción	8
2. Objetivos	9
2.1. Objetivo general	9
2.2. Objetivos específicos	9
3. Marco teórico	9
4. Metodología	12
4.1. Revisión bibliográfica	12
4.2. Caracterización del desempeño de los agregados	12
4.3. Diseño de mezcla	15
4.4. Montaje experimental	20
4.5. Ensayo de concreto endurecido	23
4.6. Análisis estadístico	23
5. Resultados y análisis	26
5.1. Caracterización de las arenas	26
5.1.1. Arenas y gravas individuales	26
5.1.2. Arena combinada y grava combinada	27
5.2. Diseño de mezcla	30
5.3. Montaje experimental	31
5.4. Ensayo del concreto endurecido	35
5.5. Análisis estadístico	36
6. Conclusiones	39
7. Referencias bibliográficas	40

Lista de tablas

Tabla 1. Requisitos de gradación para el agregado fino. Tomado de NTC 77	13
Tabla 2. Requisitos de gradación para el agregado grueso. Tomado de NTC 77	13
Tabla 3. Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción. Tomado de ACI 211-1	16
Tabla 4. Proporción aproximada de agua y contenido de aire. Tomado de ACI 211-1	17
Tabla 5. Resistencia de diseño con mínimo 30 registros. Tomado de ACI 211-1	17
Tabla 6. Resistencia de diseño con 15-19 registros. Tomado de ACI 211-1	18
Tabla 7. Resistencia de diseño con menos de 15 registros. Tomado de ACI 211-1	18
Tabla 8. Relación agua/cemento para diferentes resistencias. Tomado de ACI 211-1	18
Tabla 9. Volumen del agregado grueso. Tomado de ACI 211-1	19
Tabla 10. Factores para calcular la desviación estándar dentro del ensayo. Tomado de NTC 2275	24
Tabla 11. Normas para el control del concreto. Tomado de NTC 2275	25
Tabla 12. Valores de t. Tomado de NTC 2275	25
Tabla 13. Parámetros físicos promedio mensual de las 4 arenas evaluadas. Elaboración propia..	26
Tabla 14. Parámetros físicos promedio mensual de las dos gravas evaluadas. Elaboración propia	27
Tabla 15. Parámetros físicos del agregado fino usado en la mezcla de concreto. Elaboración propia.....	28
Tabla 16. Parámetros físicos del agregado grueso usado en la mezcla de concreto. Elaboración propia.....	29
Tabla 17. Parámetros del diseño de mezcla. Elaboración propia.....	30
Tabla 18. Proporcionamiento del diseño. Elaboración propia	31

Tabla 19. Resultados de los ensayos del concreto en estado fresco. Elaboración propia32

Tabla 20. Resultados promedio de la resistencia a 3, 7 y 28 días. Elaboración propia.....35

Tabla 21. Datos de resistencia de las muestras de concreto de 35 MPa diseñado. Elaboración propia.....36

Tabla 22. Resultados estadísticos obtenidos para el concreto de 35 MPa diseñado. Elaboración propia.....36

Lista de imágenes

Imagen 1. Toma de asentamiento. Elaboración propia	21
Imagen 2. Toma del rendimiento volumétrico. Elaboración propia	21
Imagen 3. Toma de temperatura. Elaboración propia	22
Imagen 4. Elaboración de especímenes. Elaboración propia	22
Imagen 5. Esquema de los patrones de fractura típicos. Tomado de NTC 673	23

Lista de gráficas

Gráfica 1. Distribución granulométrica de la arena combinada. Elaboración propia	27
Gráfica 2. Distribución granulométrica de la grava combinada. Elaboración propia	29
Gráfica 3. Proporción de diseño. Elaboración propia	32
Gráfica 4. Proporción modificada a 1:2.48:2.48. Elaboración propia.....	33
Gráfica 5. Proporción modificada a 1:2.58:2.38. Elaboración propia.....	34
Gráfica 6. Distribución normal de frecuencia para el concreto de 35 MPa diseñado. Elaboración propia.....	37
Gráfica 7. Evaluación estadística del concreto de 35 MPa diseñado	38

Resumen

Se planteó y ejecutó un diseño de mezcla de concreto que cumpla solicitudes de carga del orden de 35 MPa, para el cual se realizó inicialmente la caracterización de los agregados fino y grueso que fueron utilizados. Con este diseño planteado se produjeron 15 diferentes muestras que fueron ensayadas en su estado fresco, y que luego fueron destinadas a ser sometidas a ensayos de compresión a diferentes edades. Finalmente, con los resultados obtenidos se llevaron a cabo algunos análisis estadísticos para determinar su eficacia. Cabe resaltar que todo fue ejecutado siguiendo los lineamientos de las Normas Técnicas Colombianas para garantizar la calidad de los resultados. Así pues, se obtuvieron resultados óptimos y que cumplieron a cabalidad con las expectativas iniciales.

1. Introducción

El material de construcción más usado en el mundo es sin duda el concreto. Esto se debe a su gran versatilidad en cuanto a forma, función y economía (Sánchez, 2001). Es por ello que el concreto ha sido objeto de innumerables investigaciones que han dado como resultado características mejoradas, tanto en su resistencia como en su durabilidad (PSI, 2021). De estas investigaciones ha nacido el concreto de alta resistencia, considerado como un concreto especial gracias al desempeño que presenta, diferente al de los concretos convencionales y que es igual o superior a 35 MPa, según lo determina el Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés).

Para alcanzar una alta resistencia, es imperativo que los componentes que se utilicen tengan propiedades y proporciones específicas, que la relación entre agua y cemento sea baja, el uso de aditivos que aumenten su desempeño, entre muchas otras indicaciones que buscan generar beneficios óptimos. Todo lo anterior se logra por medio de un adecuado diseño de mezcla de concreto, que garanticen que todos los requerimientos de resistencia, durabilidad y calidad se cumplan a cabalidad.

Con este proyecto se busca, entonces, obtener el diseño de mezcla de un concreto que alcance una resistencia mínima requerida de 35 MPa, mediante un análisis detallado y un montaje experimental que contemple todos los ensayos que sean necesarios. Estos ensayos consideran parámetros físicos de los agregados a utilizar, tales como granulometría, pesos unitarios suelto y compacto, gravedad específica, densidad, absorción y humedad; así mismo, se evaluará el concreto obtenido con el diseño propuesto, aplicando ensayos en su estado fresco como trabajabilidad, temperatura, peso unitario y contenido de aire; cuando haya endurecido se realizarán ensayos de resistencia. Todo lo anterior se hará ciñéndose a los lineamientos dictados por las normas colombianas NSR-10 y NTC.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Formular un diseño de mezcla de concreto que alcance una resistencia mínima requerida de 35 MPa mediante un estudio técnico que contemple todos los parámetros estipulados en las normas NSR-10 y NTC.

2.2. Objetivos específicos

- Analizar los parámetros de mayor importancia en la realización de un diseño de mezcla de concreto.
- Determinar la dosificación de agregados que brinde el desempeño ideal para ser utilizados en la mezcla de concreto.
- Evaluar las diferentes variables que intervienen a la hora de ejecutar el diseño de mezcla propuesto.
- Obtener conclusiones acerca de la viabilidad del diseño de mezcla formulado.

3. Marco teórico

La norma americana ASTM C125 (Standard Definition of Terms Relating to Concrete and Concrete Aggregates) define al concreto como un material compuesto que consiste esencialmente de un medio de enlace en donde están embebidas partículas de agregado. La norma colombiana NSR-10, en su Título C (Concreto Estructural) añade, además, que dicha mezcla está compuesta por cemento hidráulico (u otro cementante), agregado fino, agregado grueso, agua y, en algunas ocasiones, aditivos. Estos aditivos pueden ser incorporados para diferentes propósitos, como acelerar o retardar el fraguado, mejorar la trabajabilidad, reducir la cantidad de agua necesaria en la mezcla, incrementar la resistencia o modificar otras propiedades del concreto (Rivva, 1992). Éste es el material más usado para la construcción en el mundo, y lo es dada su alta resistencia a la compresión y, aunque no es igual de resistente a la flexión, esto se solventa fácilmente al reforzarse con acero (Agüero et. Al, 2019). Además, presenta otros factores que lo hacen un material universal, dentro de las que se encuentran la facilidad con que puede tomar la forma de los diferentes encofrados mientras aún presente una consistencia plástica y su elevada resistencia al fuego y a la penetración del agua (Abanto, s.f).

Adicional a lo anterior, es importante tener en cuenta la durabilidad del concreto, referido a la capacidad de soportar las condiciones físicas y químicas a las que está expuesto, y que podrían provocar su degradación (Ministerio de Fomento, citado en Ochoa, 2018). Según Gómez (citado en Ochoa, 2018), esta durabilidad depende, además de los factores externos, de las características y calidad de los materiales, como el tipo de cemento, adiciones minerales presentes, características de agregados y agua utilizada, relación agua/cemento, condiciones de dosificación, preparación y puesta en obra, y el curado.

Sánchez de Guzmán profundiza en las características y funciones de los componentes del concreto, y los explica cada uno. Del cemento dice que tiene propiedades tanto adhesivas como cohesivas, que le permiten aglutinar los agregados para así lograr una pasta homogénea, esto teniendo en cuenta también el grado de hidratación, la finura de las partículas, la velocidad del fraguado, el calor de hidratación, entre otros. El agua, como componente fundamental del concreto, es la que permite el fraguado del mismo; al mezclarse con el cemento se hidratan las partículas y hace que se desarrollen sus propiedades aglutinantes, así se produce la pasta, que puede ser más o menos diluida dependiendo de la cantidad de agua agregada. En el proceso de mezclado suele quedar aire naturalmente atrapado dentro de la masa, que posteriormente es liberado en los procesos de compactación; sin embargo, en algunas ocasiones se incluyen, por medio de aditivos, burbujas de aire, que suelen ser más densas que las naturales. Éstas no se destruyen en el proceso de compactación, pues su función es impedir la permeabilidad del concreto. Los aditivos, por su parte, pueden ser reductores de agua, retardantes o acelerantes del fraguado, dependiendo de las necesidades particulares de cada concreto; así mismo, existen aditivos inclusores de aire, puzolanas, colorantes, entre otros. Sea cual sea el aditivo que se utilice, su función es modificar las propiedades del concreto, de manera que lo hagan más adecuado para las condiciones de trabajo. Su uso también puede estar ligado a razones de orden económico, pues en algunos casos permiten reducir los costos de fabricación. Sánchez de Guzmán también se refiere a los agregados, pero este tema se tocará un poco más adelante.

Dado que en el concreto intervienen varias variables precisas, éste no se puede fabricar de manera empírica. Es en este punto en donde entra el diseño de las mezclas de concreto, entendiéndose como el proceso mediante el cual se seleccionan los componentes del concreto y se determinan sus cantidades necesarias para producir un concreto de viabilidad técnica y económica (Sánchez, 2001). Este diseño de mezcla debe considerar el medio ambiente en el que estará el concreto; es decir, exposición al agua de mar, a tránsito vehicular, peatonal y de montacargas, o climas extremos (IMCYC, 2004). Además, Mather (2004) menciona que el concreto diseñado debe tener la suficiente resistencia como para soportar las cargas aplicadas (éstas dependen de cada proyecto particular). Adicionalmente, el concreto debe ser trabajable y cohesivo cuando está fresco, y resistente y durable una vez haya fraguado (IMCYC, 2004). Como se explica en la norma NSR-10, estas mezclas de concreto deben ser dosificadas, para que cumplan con la relación agua/cemento y otros requisitos basados en la clase de exposición a la que vaya a estar sometido

dicho concreto. También se menciona en la misma norma que la dosificación de los materiales para el concreto debe establecerse para lograr:

- Trabajabilidad y consistencia que permitan colocar fácilmente el concreto dentro del encofrado y alrededor del refuerzo, sin segregación ni exudación excesiva.
- Resistencia a exposiciones especiales.
- Conformidad con los requisitos del ensayo de resistencia.

Al dosificar una mezcla de concreto se determina la combinación más práctica y económica de los agregados disponibles, cemento, agua y aditivos, con el fin de producir una mezcla con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera las características de resistencia y durabilidad necesarias para el tipo de construcción en que habrá de utilizarse (Rivera, s.f).

Al hablar de la dosificación del concreto, se hace necesario también tocar el tema de los agregados, pues son parte fundamental de la mezcla. Ochoa (2018) explica que los agregados representan aproximadamente entre el 60% y 75% del contenido del concreto, por lo que es fundamental que estos materiales cuenten con características físicas y mineralógicas que garanticen un buen desempeño. La norma ASTM C125 explica que estos agregados son materiales granulares, que se dividen en dos: El agregado grueso se refiere al predominantemente retenido en el tamiz número 4, y debe ser duro, resistente, limpio y sin recubrimiento de materiales extraños. El agregado fino, comúnmente llamado arena, es el que pasa el tamiz 3/8 y casi completamente pasa también el tamiz número 4; sin embargo, su gran mayoría no debe sobrepasar el tamiz número 200. Al igual que el grueso, el agregado fino debe estar bien gradado y limpio. La norma NTC 174, regente en el país, agrega, además, que el agregado fino debe estar compuesto de arena natural, combinada, o una combinación de ambas; también debe estar libre de impurezas orgánicas, carbón, arcillas, limos y cualquier otra sustancia que se considere dañina según la norma mencionada. Por otro lado, esta norma dice del agregado grueso debe estar compuesto de grava, grava triturada, roca triturada, escoria de alto horno enfriada al aire, o concreto triturado fabricado con cemento hidráulico o una combinación de estos.

4. Metodología

Lo primero que se debe mencionar es que todos los ensayos y evaluaciones mencionadas a continuación fueron llevadas a cabo en el laboratorio de la Planta de Concretos Grupo San Pío. Para formular el diseño de una mezcla de concreto que alcance una resistencia mínima requerida de 35MPa, se empleó una metodología dividida en varias etapas, así:

4.1. Revisión bibliográfica

Se realizó un análisis de la bibliografía existente, con el fin de contextualizar correctamente las siguientes etapas. Con esta revisión bibliográfica se expusieron conceptos que permitieron obtener dicha contextualización, y se concentró principalmente en el marco normativo colombiano.

4.2. Caracterización del desempeño de los agregados

Con el fin de realizar la caracterización de cada uno de los agregados usados en la mezcla de concreto y determinar su comportamiento, se realizaron ensayos de granulometría, masas unitarias, densidades, absorción y humedad a cuatro diferentes arenas y dos gravas, así como a la combinación de éstas, todo según lo dicta las Normas Técnicas Colombianas.

Granulometría: Siguiendo las indicaciones de la norma NTC-77 (2018), se tomó una muestra de cada agregado (700 gr para las arenas, 5000 gr para las gravas) en su estado húmedo y se secó en el horno. Seguidamente se tomó su peso seco y se lavó para eliminar partículas de arcilla o limos presentes, y se secó nuevamente. Finalmente se hizo pasar por una serie de tamices ordenados por tamaño de aberturas reducidas progresivamente, con el fin de separar la muestra y obtener la cantidad de material retenido en cada tamiz. A partir de este procedimiento se calculó el porcentaje total de muestra que pasa cada tamiz, el porcentaje total de muestra retenido en cada tamiz y el módulo de finura como la suma de los porcentajes acumulados en la serie normalizada de tamices, divididos por 100 (Ecuación 1).

$$MF = \frac{3/8+n^{\circ}4+n^{\circ}8+n^{\circ}16+n^{\circ}30+n^{\circ}50+n^{\circ}100}{100} \quad (1)$$

Es importante aclarar que el módulo de finura sólo se calcula para las arenas. Así mismo, la norma NTC-77 indica unos límites máximos y mínimos permitidos, dentro de los cuales se deben encontrar la granulometría de las arenas (Tabla 1) y de las gravas (Tabla 2).

Tabla 1. Requisitos de gradación para el agregado fino. Tomado de NTC 77

Tamiz NTC 32 (ASTM E 11)	Porcentaje que pasa
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 μm	25 a 60
300 μm	10 a 30
150 μm	2 a 10

Tabla 2. Requisitos de gradación para el agregado grueso. Tomado de NTC 77

Número del tamaño del agregado	Tamaño nominal (tamices de abertura cuadrada)	Material que pasa uno de los siguientes tamices (porcentaje en masa)												
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm (No.4)	2,36 mm (No.8)	1,18 mm (No.16)
1	90 mm a 37,5 mm	100	90-100	-	25- 60	-	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
2	63 mm a 37,5 mm	-	-	100	90-100	35-70	0-15	-	0-5	-	-	-	-	-
3	50 mm a 25,0 mm	-	-	-	100	90-100	35-70	-	-	0-5	-	-	-	-
357	50 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	-	0-5	-	-
4	37,5 mm a 19,0 mm	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	-	0-5	-	-	-
467	37,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	100	95-100	-	35-70	-	10-30	0-5	-	-
5	25,0 mm a 12,5 mm	-	-	-	-	-	100	-	20-55	0-10	0-5	-	-	-
56	25,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5	-	-
57	25,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	100	95-100	-	25-60	-	0-10	0-5	-
6	19,0 mm a 9,5 mm	-	-	-	-	-	-	100	90-100	20-55	0-15	0-5	-	-
67	19,0 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	100	90-100	-	20-55	0-10	0-5	-
7	12,5 mm a 4,75 mm (No.4)	-	-	-	-	-	-	-	100	90-100	40-70	0-15	0-5	-
8	9,5 mm a 2,36 mm (No.8)	-	-	-	-	-	-	-	-	100	85-100	10-30	0-10	0-5

Pasante tamiz n°200: (Tomado de NTC-78, 2019). Este proceso fue una continuación de la granulometría de los agregados, en el que se calculó la cantidad porcentual de partículas de arcillas y limos presentes en la muestra tomada, y que se dispersaron gracias al lavado al que se sometió la muestra (como se mencionó en la descripción de la granulometría). Al momento de realizar dicho lavado, la muestra se pasó a través del tamiz #200, agitándose para lograr la separación de las partículas. Finalmente, y tomando el peso del agregado luego del lavado y el secado en el horno, se realizó el siguiente cálculo:

$$A = \frac{B-C}{B} * 100 \quad (2)$$

Donde:

A: Porcentaje del material más fino que el tamiz #200

B: Masa seca original de la muestra, en g

C: Masa seca de la muestra después del lavado, en g

Masa unitaria: Se determinó la masa unitaria suelta y compacta de cada uno de los agregados, de acuerdo a lo que se indica en la norma NTC-92 (2019). Para realizar ambos procedimientos fue necesario secar en el horno la muestra tomada.

- **Suelta:** Se llenó hasta rebose el molde que se utiliza para los ensayos de masa unitaria, usando una cuchara ubicada a aproximadamente 50mm sobre la superficie del molde. Acto

seguido, se niveló la superficie con una plantilla recta. Finalmente, se tomó la masa de cada agregado.

- **Compacta:** Se llenó una tercera parte del molde y se apisonó dando 25 chuzones con una varilla de apisonamiento, seguidos de 15 golpes dados con un mazo. Se repitió el proceso con los 2 tercios del molde restantes, y se enrasó al estar completamente lleno del molde; finalmente, se tomó la masa.

Luego de haber realizado ambos procedimientos, se calculó la densidad volumétrica de cada agregado, dividiendo la masa tomada entre el volumen del molde (NTC 92, 2019).

Materia orgánica: El ensayo para determinar la presencia de materia orgánica en los agregados se realiza solamente en arenas. Siguiendo las indicaciones de la norma NTC-127 (2005), se llenó una botella de vidrio con aproximadamente 130 ml de arena. Posteriormente, se añadió una solución de hidróxido de sodio hasta alcanzar alrededor de 200 ml, y se dejó en reposo 24 horas. Transcurrido el tiempo estipulado, se comparó el color con la tabla de Colores Gardner, y de acuerdo a esto se determinó si la arena es dañina o no dañina.

Densidad del agregado fino: Como se explica en la norma NTC-237 (2020), inicialmente se tomó una muestra de arena de aproximadamente 1 kg, y se dejó secar para eliminar la humedad del material. Seguidamente, se hidrató hasta alcanzar el estado SSS (Saturado Superficialmente Seco), corroborado usando el cono de apisonamiento. Luego, de esta muestra en estado SSS se tomaron 500gr y se introdujo en un pignómetro con agua, se sacudió hasta que salió todo el aire atrapado, y se sumergió en agua a una temperatura de 23°C +/- 2°C durante 24 horas +/- 4 horas. Parado este tiempo, se tomó el peso del pignómetro lleno del agua y el material, para luego retirar la arena del pignómetro y secarlo al horno. Finalmente, cuando la muestra estuvo seca y fría, se tomó su peso seco.

Basado en este procedimiento se calcula la densidad relativa (gravedad específica) seca al horno (Ecuación 3), la densidad relativa (gravedad específica) en estado SSS (Ecuación 4), la densidad relativa (gravedad específica) aparente (Ecuación 5) y la absorción del material (Ecuación 6), así:

$$\text{Densidad relativa (SH)} = \frac{A}{B+S-C} \quad (3)$$

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \frac{S}{B+S-C} \quad (4)$$

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{B+A-C} \quad (5)$$

$$Absorción = \frac{S-A}{A} * 100 \quad (6)$$

Donde

A: Masa seca al horno

B: Masa del pignómetro con agua

C: Masa del pignómetro con agua y el material

S: Muestra en estado SSS

Densidad del agregado grueso: Como lo indica la norma NTC-176 (2019), se tomó una muestra de agregado de aproximadamente 3 kg, y se dejó sumergida en agua durante 24 h +/- 4h. Transcurrido el tiempo especificado, se secó dicha muestra con un paño absorbente, con el fin de eliminar el agua superficial y así obtener una muestra de 2500 gr en estado SSS (Saturado y Superficialmente Seco). Luego se tomó esta muestra y se sumergió en agua a 23°C +/- 2°C, con el fin de conocer su masa aparente y, finalmente, se secó la muestra en el horno, para tomar el peso seco.

Con este procedimiento se calculó la absorción del material (Ecuación 7) y la densidad relativa (gravedad específica) del mismo. Esta última, así como en el agregado fino, se expresa en densidad relativa seca al horno (Ecuación 8), densidad relativa saturada y superficialmente seca (Ecuación 8), y densidad relativa aparente (Ecuación 9).

$$Absorción = \frac{B-A}{A} * 100 \quad (7)$$

$$Densidad\ relativa(SH) = \frac{A}{(B-C)} \quad (8)$$

$$Densidad\ relativa\ (SSS) = \frac{B}{(B-C)} \quad (9)$$

$$Densidad\ relativa\ aparente = \frac{A}{(A-C)} \quad (10)$$

4.3. Diseño de mezcla

Para llevar a cabo el diseño de mezcla para un concreto que alcance una resistencia mínima de 35 MPa, se utilizó el método ACI 211.1, referente al proporcionamiento de materiales para el diseño de mezclas de concreto de peso normal y denso, basado en un peso estimado del concreto por volumen unitario.

Elección del asentamiento: Se eligió de la tabla (3), pensando en que el concreto producido con este diseño tuviera una buena manejabilidad, dependiendo del tipo de construcción en el que se vaya a usar.

Tabla 3. Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción. Tomado de ACI 211-1

TIPOS DE CONSTRUCCIÓN	REVENIMIENTO (cm)	
	MÁXIMO	MÍNIMO
Muros de cimentación y zapatas reforzadas	7.5	2.5
Muros de sub estructuras, cajones y zapatas sin refuerzo	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10.0	2.5
Columnas de edificios	10.0	2.5
Losas y pavimentos	7.5	2.5
Concreto masivo	7.5	2.5

Elección del tamaño máximo nominal del agregado: El tamaño máximo del agregado se escogió de acuerdo al disponible en la empresa. Este tamaño debe guardar relación con las dimensiones de la estructura para la cual se esté diseñando, en ningún caso debe exceder:

- 1/5 de la menor dimensión entre los costados de los moldes
- 1/3 del espesor de las losas
- 3/4 del espacio libre mínimo entre varillas de refuerzo individuales, paquetes de varillas o torones de pretensado.

Cálculo del agua y contenido de aire: Se tomó de la tabla (4), en la que se proporciona la cantidad de agua (en kg/m³ de concreto) y el porcentaje de aire atrapado en función de:

- Tipo de concreto, que se divide en concretos sin aire incluido y con aire incluido, que a su vez depende de si el nivel de exposición es bajo, medio o extremo.
- Asentamiento
- Tamaño máximo nominal del agregado

Tabla 4. Proporción aproximada de agua y contenido de aire. Tomado de ACI 211-1

REVENIMIENTO		AGUA, kg/m ³ DE CONCRETO PARA LOS TAMAÑOS MÁXIMOS NOMINALES DE AGREGADO INDICADOS							
(cm)	(pulg)	9.5mm (3/8")	12.5mm (1/2")	19mm (3/4")	25mm (1")	37.5mm (1 1/2")	50mm (2")	75mm (3")	150mm (6")
CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO									
2.5 a 5.0	1 a 2	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10	3 a 4	228	216	205	193	181	169	145	124
15 a 17.5	6 a 7	243	228	216	202	190	178	160	-
CANTIDAD APROXIMADA DE AIRE ATRAPADO EN EL CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO (%)		3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
CONCRETO CON AIRE INCLUIDO									
2.5 a 5.0	1 a 2	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 a 10	3 a 4	202	193	184	175	165	157	133	119
15 a 17.5	6 a 7	216	205	197	184	174	166	154	-
CONTENIDO PROMEDIO TOTAL DE AIRE PARA EL NIVEL DE EXPOSICIÓN (%)									
EXPOSICIÓN	Baja	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0
	Media	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0
	Extrema	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0

Selección de la relación agua-cemento: Referida a la razón existente entre el peso del agua y el peso del cemento (Ecuación 11).

$$A/C = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de cemento}} \quad (11)$$

La relación agua-cemento depende de la resistencia de diseño (f'_{cr}) del concreto, diferente y mayor a la resistencia especificada (f'_c); por esta razón, primero se determinó dicha resistencia f'_{cr} . Ésta se determina en función de la disponibilidad de registros de ensayos previos, tomando en cuenta el valor de la desviación estándar S obtenida, y existen 3 casos distintos:

- Se cuenta con una cantidad mínima de 30 registros

Tabla 5. Resistencia de diseño con mínimo 30 registros. Tomado de ACI 211-1

ESFUERZO A COMPRESIÓN ESPECIFICADO f'_c	ESFUERZO PROMEDIO REQUERIDO A COMPRESIÓN f'_{cr} , kgf/cm ²
$f'_c \leq 350$ kgf/cm ²	$f'_{cr} = f'_c + 1.34s$
	$f'_{cr} = f'_c + 2.33s - 35$
	Usar el mayor valor que se obtenga
$f'_c > 350$ kgf/cm ²	$f'_{cr} = f'_c + 1.34s$
	$f'_{cr} = 0.9f'_c + 2.33s$
	Usar el mayor valor que se obtenga

- Se cuenta con 15 a 29 registros:

Tabla 6. Resistencia de diseño con 15-19 registros. Tomado de ACI 211-1

No. DE PRUEBAS	FACTOR DE MODIFICACIÓN PARA LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR
< 15	Usar tabla 5.3.2.2 de ACI 318-02
15	1.16
20	1.08
25	1.03
≥ 30	1.00

- Se cuenta con menos de 15 registros, o no se dispone de datos para establecer una desviación estándar

Tabla 7. Resistencia de diseño con menos de 15 registros. Tomado de ACI 211-1

ESFUERZO A COMPRESIÓN ESPECIFICADO f_c , kgf/cm ²	ESFUERZO PROMEDIO REQUERIDO A COMPRESIÓN f_{cr} , kgf/cm ²
< 210	$f_c + 70$
210 - 350	$f_c + 84$
>350	$1.10f_c + 49$

Después de haber determinado la resistencia de diseño, se procedió a especificar la relación agua-cemento, tomada de la tabla (8).

Tabla 8. Relación agua/cemento para diferentes resistencias. Tomado de ACI 211-1

ESFUERZO A COMPRESIÓN A 28 DÍAS, kgf/cm ²	RELACIÓN AGUA/CEMENTO, POR PESO	
	CONCRETO CON AIRE INCLUIDO	CONCRETO SIN AIRE INCLUIDO
420	0.41	-
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Cálculo del contenido de cemento: Éste se deriva del cálculo de la relación agua-cemento. Así, el contenido de cemento se calculó como el contenido estimado de agua dividido entre la relación agua-cemento (Ecuación 12).

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{\text{Contenido de agua}}{A/C} \quad (12)$$

Estimación del contenido de agregado grueso: Inicialmente, de la tabla (9) se tomó el volumen del agregado, en m³, con base al peso volumétrico varillado seco, para un m³ de concreto. Luego,

este volumen se convirtió a peso seco del agregado grueso requerido en un m³ de concreto, al multiplicarlo por el peso volumétrico varillado en seco por m³ de agregado grueso.

Tabla 9. Volumen del agregado grueso. Tomado de ACI 211-1

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DEL AGREGADO		VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO VARILLADO EN SECO POR VOLUMEN UNITARIO DE CONCRETO PARA DIFERENTES MÓDULOS DE FINURA DEL AGREGADO FINO			
		2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 mm	3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 mm	1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
19 mm	3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
25 mm	1"	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 mm	1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
50 mm	2"	0.78	0.76	0.74	0.72
75 mm	3"	0.82	0.80	0.78	0.76
150 mm	6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Estimación del contenido de agregado fino: Para determinar el contenido de agregado fino para un m³ de concreto, la ACI 211-1 sugiere dos formas: Por el método de peso y por el método de volumen absoluto. En este caso se usó el primero.

Inicialmente se calculó el peso teórico del concreto fresco por m³, utilizando la ecuación (13).

$$U = 10Ga(100 - A) + C_M(1 - Ga/G_C) - W_M(Ga - 1) \quad (13)$$

Donde

U: Peso del concreto fresco, por m³

Ga: Promedio pesado del peso específico de la combinación de agregado fino y grueso, a granel en condición SSS.

Gc: Peso específico del cemento

A: Porcentaje de contenido de aire

Wm: Requerimiento de agua, kg/m³

Cm: Requerimiento de cemento, kg/m³

Luego de obtener el peso teórico del concreto, se procedió a estimar el contenido de agregado fino, que se hace restando al peso del concreto fresco la suma de las cantidades de agua, cemento y agregado grueso, así:

$$\text{Agregado fino} = U - (\text{peso de agua} + \text{peso de cemento} + \text{peso agregado grueso}) \quad (14)$$

El resultado se expresa en kg/m³ de concreto.

Ajuste de agua por humedad del agregado: Se realiza debido a que los ensayos mencionados se aplican a los agregados en estado seco, pero en la realidad los materiales usados son absorbentes y presentan humedad superficial, condiciones que alteran el contenido de agua necesaria. Así, para

realizar este ajuste primero se determinó los pesos húmedos tanto del agregado fino como del agregado grueso, utilizando las ecuaciones (15) y (16), respectivamente.

$$\text{Agregado fino húmedo} = \text{Agregado fino seco}(1 + \omega_{af}) \quad (15)$$

$$\text{Agregado grueso húmedo} = \text{Agregado grueso seco}(1 + \omega_{ag}) \quad (16)$$

A continuación, se recalculó el agua necesaria para el diseño del concreto, tomando el peso seco de cada agregado y multiplicándolo por la diferencia de los porcentajes humedad y absorción de los mismos (Ecuaciones 17 y 18), para luego restarle dichos valores al agua determinada inicialmente (Ecuación 19).

$$\text{Agua aportada Ag. grueso} = \text{Peso grava seca}(\omega_{ag} - \text{abs}_{ag}) \quad (17)$$

$$\text{Agua aportada Ag. fino} = \text{Peso arena seca}(\omega_{af} - \text{abs}_{af}) \quad (18)$$

$$\text{Agua efectiva} = \text{Agua neta} - \text{Agua aportada Ag. grueso} - \text{Agua aportada Ag. fino} \quad (19)$$

Proporcionamiento del diseño: Se refiere a la dosificación de la mezcla, en la que se determinó la cantidad de agregado necesario para 1 kg de concreto. Así, se tomó el peso de ambos tipos de agregados y se dividió por el peso del cemento.

4.4. Montaje experimental

Siguiendo la norma NTC-1377 (2021), se montaron 15 diferentes muestras del diseño propuesto, de manera mecánica. Inicialmente se introdujo en la concretadora los agregados grueso y fino y se mezclaron, para luego adicionar el cemento y seguir mezclando. Finalmente, se adicionó el agua y el aditivo, y se mezclaron todos los materiales hasta obtener una pasta homogénea. A esta pasta se le realizaron los siguientes ensayos:

Asentamiento: En una superficie plana se ubicó el molde troncocónico que se llenó con la muestra de concreto fresco, paulatinamente, con tres diferentes capas. Cada capa fue compactada con 25 inserciones de una varilla compactadora. Cuando se llenó el molde, éste se enrasó con la varilla y luego fue retirado. Finalmente, se midió la distancia vertical entre la posición inicial y la desplazada del centro de la superficie superior del concreto. (Imagen 1). Esta medida es la conocida como el asentamiento del concreto (NTC-396, 2021).



Imagen 1. Toma de asentamiento. Elaboración propia

Rendimiento volumétrico: Se llenó un recipiente de volumen conocido con la mezcla de concreto fresco, paulatinamente, en tres capas. Cada capa fue compactada con 25 inserciones de una varilla de apisonamiento, y posteriormente sometida a 15 golpes con un mazo de goma. Cuando el recipiente estuvo lleno, se enrasó utilizando una lámina de enrasado, y se tomó su peso, como se muestra en la Imagen 2 (NTC-1926, 2013). El rendimiento volumétrico se calculó dividiendo el peso del concreto entre el volumen del recipiente (Ecuación 20).

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Peso del concreto}}{\text{Volumen del recipiente}} \quad (20)$$



Imagen 2. Toma del rendimiento volumétrico. Elaboración propia

Temperatura: Siguiendo la norma NTC-3357, se introdujo el termómetro en la muestra de concreto, durante un periodo de tiempo entre 2 y 5 minutos. Pasado este tiempo se tomó la lectura de la temperatura del concreto (Imagen 3).



Imagen 3. Toma de temperatura. Elaboración propia

Elaboración de especímenes: Para realizar los cilindros destinados a fallos (según la norma NTC-1377, 2021), se tomaron formaletas con diámetro de 100mm y altura de 200mm, y se llenaron hasta la mitad con el concreto de muestra, luego se compactó el material mediante 25 inserciones de una varilla y 15 golpes con un mazo de goma. Se procedió de la misma manera con la mitad restante de la formaleta, y finalmente se enrazó con una llana (Imagen 4). Se dejó fraguar el concreto, y cuando estuvieron en condiciones se desencofraron, se marcaron y se llevaron a los tanques de curado, en donde estuvieron sumergidos en agua hasta el día en que fueron fallados. Este procedimiento se repitió para 11 cilindros por cada muestra. De estos 11 cilindros 3 se destinaron a ser fallados a los 3 días de preparados, 3 a 7 días, 3 a 28 días y 2 a 90 días; estos últimos se tuvieron en caso de que a los 28 días no se alcanzara la resistencia esperada.



Imagen 4. Elaboración de especímenes. Elaboración propia

4.5. Ensayo del concreto endurecido

Los fallos de los cilindros pertenecientes a las 15 muestras tomadas se realizaron a las edades de 3 días, 7 días y 28 días, contados a partir del moldeado de los especímenes. Para esto se tomo de cada cilindro su altura y dos medidas de diámetros, que posteriormente se promediaron. Luego, cada cilindro fue introducido en la máquina de fallos, de acuerdo a los lineamientos dictados por la norma NTC-673 (2021), y sometido a una carga continua y sin impactos, hasta que el cilindro presentó fractura. Este daño se catalogó de acuerdo a la imagen (5).

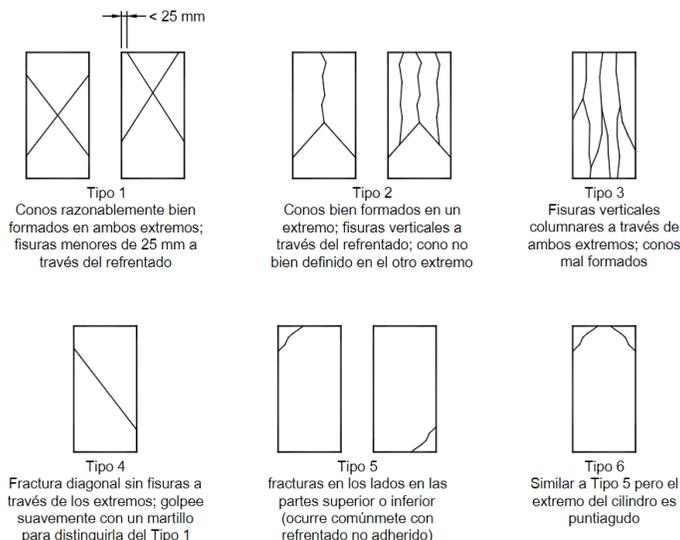


Imagen 5. Esquema de los patrones de fractura típicos. Tomado de NTC 673

Luego de cada fallo, el software arrojó la carga (en kN) a la que fue sometido el cilindro y el esfuerzo (en MPa) que soportó; estos datos fueron condensados en un documento de Excel para realizar un análisis estadístico.

4.6. Análisis estadístico

Luego de haber fallado los cilindros a 28 días, se procedió a agrupar los resultados para realizar el análisis estadístico, como lo dicta la norma NTC-2275 (1997). Este análisis estadístico contiene:

Promedio: Es la resistencia promedio de todos los ensayos individuales (Ecuación 21)

$$\bar{X} = \frac{X_1+X_2+\dots+X_n}{n} \tag{21}$$

Desviación estándar: También es conocida como la desviación estándar de mezcla a mezcla. Se calcula como la raíz cuadrada media de la desviación de las resistencias, en relación a su promedio (Ecuación 22).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}}{n-1}} \quad (22)$$

Coefficiente de variación: Expresa la desviación estándar como porcentaje de la resistencia promedio (Ecuación 23).

$$V = \frac{\sigma}{\bar{X}} * 100 \quad (23)$$

Rango: Se calcula restando la resistencia menor de la resistencia mayor en un grupo de 3 cilindros.

Dado que una sola mezcla de concreto no proporciona los datos suficientes para el análisis estadístico, es necesario realizar mínimo 10 mezclas. Así, la desviación estándar dentro del ensayo se calculó utilizando la tabla (10) y la ecuación (24)

Tabla 10. Factores para calcular la desviación estándar dentro del ensayo. Tomado de NTC 2275

Número 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

$$\sigma_1 = \frac{1}{d_2} * \bar{X} \quad (24)$$

Desviación estándar total: Se calcula teniendo en cuenta la desviación estándar dentro del ensayo y la desviación estándar de mezcla a mezcla (Ecuación 25).

$$\sigma^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \quad (25)$$

Con los parámetros calculados, se procedió a calificar el concreto utilizando la tabla 11, y de acuerdo a lo dicho en la norma NTC 2275.

Tabla 11. Normas para el control del concreto. Tomado de NTC 2275

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

Luego de calcular los parámetros anteriores, se graficó la curva de distribución normal de frecuencia y la resistencia promedio requerida para la mezcla, utilizando la ecuación (26) y la tabla 12.

$$f'_{cr} = f'_c + t\sigma \quad (26)$$

Tabla 12. Valores de t. Tomado de NTC 2275

Porcentaje de ensayos que caen dentro de los límites $\bar{X} \pm t\sigma$	Probabilidad de que caigan por debajo del límite inferior	t
40	3 en 10	0,52
50	2,5 en 10	0,67
60	2 en 10	0,84
68,27	1 en 6,3	1,00
70	1,5 en 10	1,04
80	1 en 10	1,28
90	1 en 20	1,65
95	1 en 40	1,96
95,45	1 en 44	2,00
98	1 en 100	2,33
99	1 en 200	2,58
99,73	1 en 741	3,00

Finalmente, se graficó la carta de control, donde se evidencian los datos más relevantes de todo el análisis estadístico.

5. Resultados y análisis

5.1. Caracterización de las arenas

Para consignar la siguiente información, se tuvieron en cuenta algunas características que deben presentar los agregados que serán utilizados en un concreto, siguiendo los lineamientos principalmente de la norma NTC-174, aunque también se tuvieron en cuenta las normas ya mencionadas en la metodología. Es importante mencionar que, si bien el análisis está enfocado en la arena combinada y la grava combinada, también se realizaron los ensayos para cada arena y cada grava, de manera individual. Las arenas que se evaluaron son Amagá, cuyo proveedor es Argos y su procedencia es Amagá; Gaviria, que proviene de La Pintada y es vendida por Cantrax; Piedra Verde que es vendida por Conasfaltos; y finalmente San Lorenzo, que también proviene de La Pintada y su proveedor es San Lorenzo. Las gravas que se ensayaron fueron San Lorenzo y Piedra Verde, ambas con el mismo proveedor y la misma procedencia de sus correspondientes arenas.

5.1.1. Arenas y gravas individuales

Al momento de ensayar las arenas, se tuvo en cuenta que el módulo de finura ideal del agregado fino del concreto está entre 2.9 y 3.1, el porcentaje de material que pasa el tamiz número 200 no debe ser superior a 3% en concretos que estarán sometidos a abrasión, y debe ser máximo del 5% para concretos que no estarán sometidos a abrasión; así mismo, el material debe estar libre de materia orgánica, esto porque su presencia en la arena que va a utilizarse en una mezcla de concreto puede llegar a interrumpir parcial o totalmente el proceso de fraguado del concreto, afectando así directamente su resistencia. Adicionalmente, se tuvo en cuenta que en la empresa Grupo San Pío se manejan absorciones entre 1.6% y 1.9%.

Tabla 13. Parámetros físicos promedio mensual de las 4 arenas evaluadas. Elaboración propia

ARENA	MF	ABSORCIÓN	PASA 200	MATERIA ORGÁNICA
Amagá	3.20	1.81%	3.26%	No dañina
Gaviria	2.89	1.67%	1.67%	No dañina
Piedra Verde	2.97	2.05%	7.69%	No dañina
San Lorenzo	3.05	1.54%	1.97%	No dañina

Realizando un análisis comparativo general de los resultados presentados en la Tabla (13), se puede observar que los módulos de finura de Amagá es similar a San Lorenzo, y el de Gaviria es similar a Piedra Verde, siendo Amagá la arena más gruesa y Gaviria la más fina. Sin embargo, sólo 3 de los 4 se encuentran dentro del rango dado anteriormente. Aún así, las cuatro son aptas para ser usadas en una mezcla de concreto. En cuanto a la absorción, las arenas Gaviria y Amagá se encuentran dentro del rango recomendado; San Lorenzo tiene una absorción un poco menor y Piedra Verde la presenta superior. Esto implica que, de usarse esta última dentro de una mezcla, se

incrementaría la cantidad de agua necesaria. El porcentaje de material que pasa el tamiz número 200 es inferior al 3% en las arenas Gaviria y San Lorenzo, lo que significa que se podrían utilizar en concretos expuestos a abrasión; en Amagá supera el 3%, pero es apta para concretos que no estarán sometidos a abrasión, pues el material fino no es superior al 5%. Piedra Verde supera en 2.69% el porcentaje máximo permitido, razón por la cual no se puede usar en ninguno de los tipos de concreto mencionados. Finalmente, todas las arenas cumplen con no presentar suficiente materia orgánica, que pueda ser perjudicial para los concretos.

En cuanto a las gravas, el tamaño nominal que se evaluó fue de 25mm. El material pasante del tamiz número 200 no debe superar el 1% en ningún caso (NTC 77). Finalmente, las absorciones que maneja la empresa Grupo San Pío oscilan aproximadamente entre 0.8% y 1.3%.

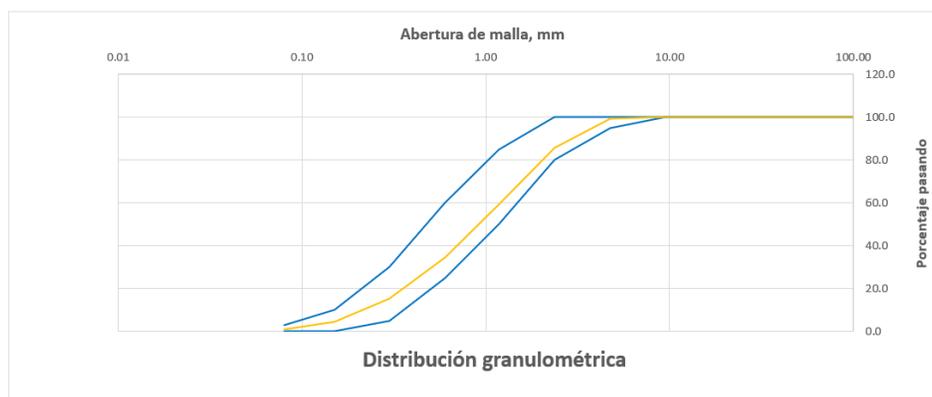
Tabla 14. Parámetros físicos promedio mensual de las dos gravas evaluadas. Elaboración propia

GRAVA	TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL	ABSORCIÓN	PASA 200
Piedra Verde	25 mm	0.77%	1.88%
San Lorenzo	25 mm	0.85%	0.50%

En la tabla (14) se ve que ambas gravas presentan el mismo tamaño nominal. La absorción de San Lorenzo está dentro del rango trabajado, mientras que Piedra Verde tiene una absorción menor; esto sugiere que San Lorenzo absorbe más agua, resultado que no concuerda con la cantidad de material pasante del tamiz número 200 que presenta cada grava, puesto que Piedra Verde triplica a San Lorenzo en este punto, y gracias a esta característica se esperaría que Piedra Verde absorbiera más agua.

5.1.2. Arena combinada y grava combinada

Como ya se mencionó, estos fueron los agregados que se utilizaron en la mezcla de concreto. La gráfica (1) corresponde a la curva granulométrica de la arena combinada.



Gráfica 1. Distribución granulométrica de la arena combinada. Elaboración propia

Se observa que la curva generada por los porcentajes que pasan cada tamiz está dentro de los límites dictados por la norma (Tabla 1), lo que da a inferir que es una arena bien gradada y tiene un tamaño acorde a lo estipulado para clasificar como agregado fino de un concreto.

En la tabla (15) se presentan los parámetros físicos de la arena combinada.

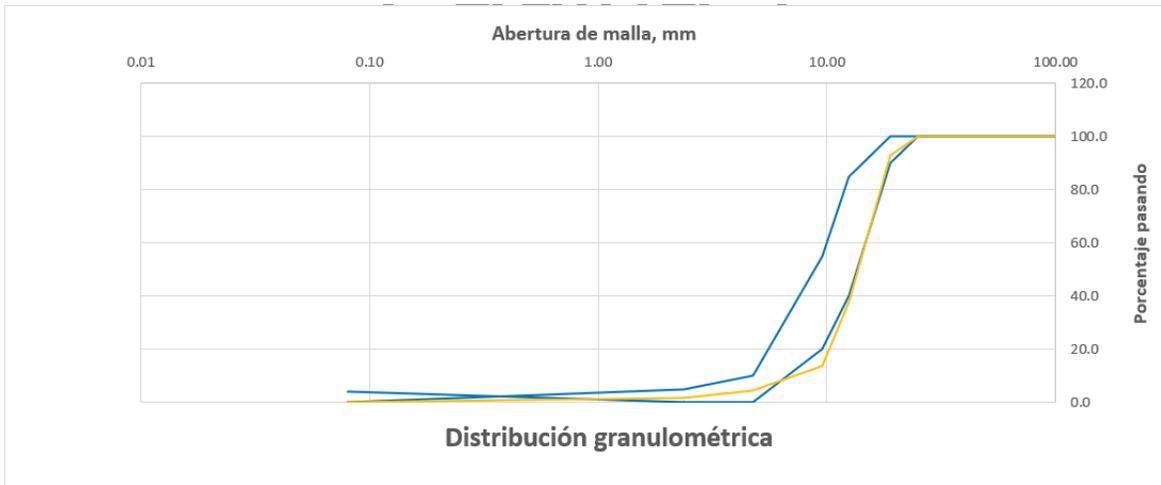
Tabla 15. Parámetros físicos del agregado fino usado en la mezcla de concreto. Elaboración propia

ARENA COMBINADA	
MF	3.02
ABSORCIÓN	1.79%
PASA 200	4.17%
MUS (kg/m ³)	1556.6
MUC (kg/m ³)	1687.3
SSS	2.693
M. ORGÁNICA	No dañina

El módulo de finura se encuentra dentro del rango mencionado anteriormente, valor que concuerda con el resultado de la gradación y corrobora que tiene un tamaño ideal para una mezcla de concreto. La absorción de la arena también se encuentra dentro del rango mencionado, lo que indica que el material, efectivamente, absorberá parte del agua de la mezcla, pero se espera que no represente un desbalance en la relación agua/cemento del concreto. En cuanto al porcentaje de material que pasa el tamiz número 200, éste no supera el 5%, por lo que la arena se puede usar en un concreto que no estará sometido a abrasión; sin embargo, sí supera el 3%, así que no es apta para un concreto que sí esté sometido a abrasión. La presencia de este material tan fino podría representar grandes diferencias en la cantidad de agua necesaria en la mezcla y, si absorbe demasiada agua, se presentarán problemas de fisura y baja resistencia en el concreto.

Las masas unitarias indican el peso del material por metro cúbico. En este caso no se conoce un valor máximo o mínimo para comparar, así que lo que se podría decir es que se espera que las partículas de la arena se acomoden correctamente en el concreto para obtener una mejor compacidad. De manera análoga sucede con la gravedad específica (SSS), que no se conoce algún valor oficial de referencia con el cual poder compararlo; así, de éste se podría decir que determina qué tan pesados son los granos de la arena. Finalmente, la materia orgánica es aceptable, pues no se considera dañina para el concreto, y no debería presentarse problemas en su fraguado.

La gráfica (2) corresponde a la curva granulométrica de la grava combinada.



Gráfica 2. Distribución granulométrica de la grava combinada. Elaboración propia

Se observa que la curva generada por los porcentajes que pasan cada tamiz está bastante cercano al límite inferior del rango dado por la norma NTC-174 (Tabla 2), y que además el porcentaje que pasa los tamices $\frac{3}{4}$ y n^o4 son inferiores a este rango. Es claro que se trata de una grava gruesa, que retiene mucho material en los tamices superiores, pero aún así su tamaño sigue clasificando para ser utilizada en un concreto, puesto que la mayoría del material que pasa cada tamiz se encuentra dentro del rango.

En la tabla (16) se presentan los parámetros físicos de la arena combinada.

Tabla 16. Parámetros físicos del agregado grueso usado en la mezcla de concreto. Elaboración propia

GRAVA COMBINADA	
TAMAÑO MÁXIMO	25 mm
ABSORCIÓN	1.11%
PASA 200	0.83%
MUS	1556
MUC	1675
SSS	2.82

El tamaño máximo nominal manejado en la empresa es de 25 mm, es decir 1". La absorción se encuentra dentro del rango ya mencionado, y quiere decir que el agua que absorba no afectará significativamente la relación agua/cemento del diseño. El porcentaje de material que pasa el tamiz número 200 es inferior al 1%, como indica la norma que debe ser; así, se puede esperar que este material no afecte la absorción de la grava y, por ende, el agua necesaria para que se mantenga la resistencia.

Con las masas unitarias suelta y compacta sucede lo mismo que con las de la arena, no se cuenta con valores de referencia para poder comparar; así que lo que se puede decir es que se espera una

correcta acomodación de las partículas que genere una buena compacidad. También se ve que son bastante similares a los presentados en la tabla (15), correspondiente a los resultados de las arenas, por lo que se podría afirmar que se espera una proporción similar de ambos agregados. De manera análoga sucede con la gravedad específica (SSS); ésta, comparándola con la de la arena, se ve que, aunque son similares, es un poco mayor la de la grava, resultado concordante con el que se espera, pues la grava contiene partículas más pesadas que las de la arena.

5.2. Diseño de mezcla

En la tabla (17) se presentan los parámetros evaluados según dicta el método ACI 211-1, que fueron previamente explicados en la metodología. Estos corresponden al diseño de una mezcla de concreto de 35 MPa.

Tabla 17. Parámetros del diseño de mezcla. Elaboración propia

ASENTAMIENTO (mm)	175
TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO (mm)	25
CONTENIDO DE AIRE (%)	1.50%
DOSIFICACIÓN DEL ADITIVO	0.80%
CONTENIDO DE AGUA EFECTIVA (lts)	153.21
$f'c$ (kg/cm ³)	350
$f'cr$ (kg/cm ³)	434
A/C	0.4
CONTENIDO DE CEMENTO (kg)	383.8
CONTENIDO A. FINO (kg)	815.93
CONTENIDO A. GRUESO (kg)	1089.16

Como no se contó con datos específicos de alguna obra, el asentamiento se eligió pensando en que fuera apto para elementos que pudieran requerir una alta resistencia, tales como elementos estructurales (Tabla 3).

El tamaño máximo nominal del agregado es de 25 mm porque era el tamaño de grava que estaba disponible, y al no contar con especificaciones particulares, se asumió que éste cumplía con las especificaciones generales para llevar a cabo un correcto diseño de mezcla.

El contenido del aire es el que se estima quede atrapado cuando se usan agregados de tamaño nominal 25 mm (Tabla 4).

Es necesario aclarar que el contenido del agua presentado en la tabla (17) ya está ajustado tanto por la humedad y la absorción de los agregados fino y grueso, como por el aditivo usado. Este

aditivo fue Sikaplast 5500, perteneciente a la empresa Sika. Se trata de un plastificante reductor de agua, como se explica en la ficha técnica del producto, y a la vez funciona como un economizador de cemento. Sikaplast 5500 tiene la capacidad de reducir hasta un 30% el agua necesaria en una mezcla, con una proporción que va desde el 0.2% hasta el 1% del contenido del cemento, sin que por ello se pierda plasticidad. La economía lograda en el cemento se explica gracias a la reducción del agua, pues al ser necesaria menos cantidad de agua, también se requeriría menos cemento, sin que esto afecte la relación A/C y por ende la resistencia buscada.

La resistencia especificada en kg/cm³ es la equivalente a 35MPa que, como se ha dicho a lo largo de todo el informe, es la buscada.

La resistencia de diseño corresponde a un valor mayor que la resistencia especificada, y se calcula pensando en tener un margen de error, tal que si se presenta alguna inconsistencia, todavía se pueda alcanzar la resistencia especificada. Para este caso corresponde a aproximadamente 42.6MPa.

La relación A/C se escogió de acuerdo a la resistencia de diseño (Tabla 8).

El contenido de cemento, como ya se explicó, también fue modificado al cambiar el agua requerida, pues si no se hubiera usado el aditivo se habría necesitado una cantidad mayor de material cementante.

El contenido de agregados fino y grueso presentados, dependen de los datos iniciales de la arena y la grava: masas unitarias, humedad, absorción y densidad, el contenido de agua y de cemento. Los contenidos presentados en la Tabla (17) ya se encuentran afectados por la humedad y la absorción de cada agregado.

La tabla (18) presenta el proporcionamiento del diseño final:

Tabla 18. Proporcionamiento del diseño. Elaboración propia

PROPORCIONAMIENTO DEL DISEÑO		
Cemento	A. Fino	A. Grueso
1	2.13	2.84

El proporcionamiento expresa que para 1kg de cemento es necesario 2.13kg de agregado fino y 2.84kg de agregado grueso. El agua se calcula mediante la relación A/C.

5.3. Montaje experimental

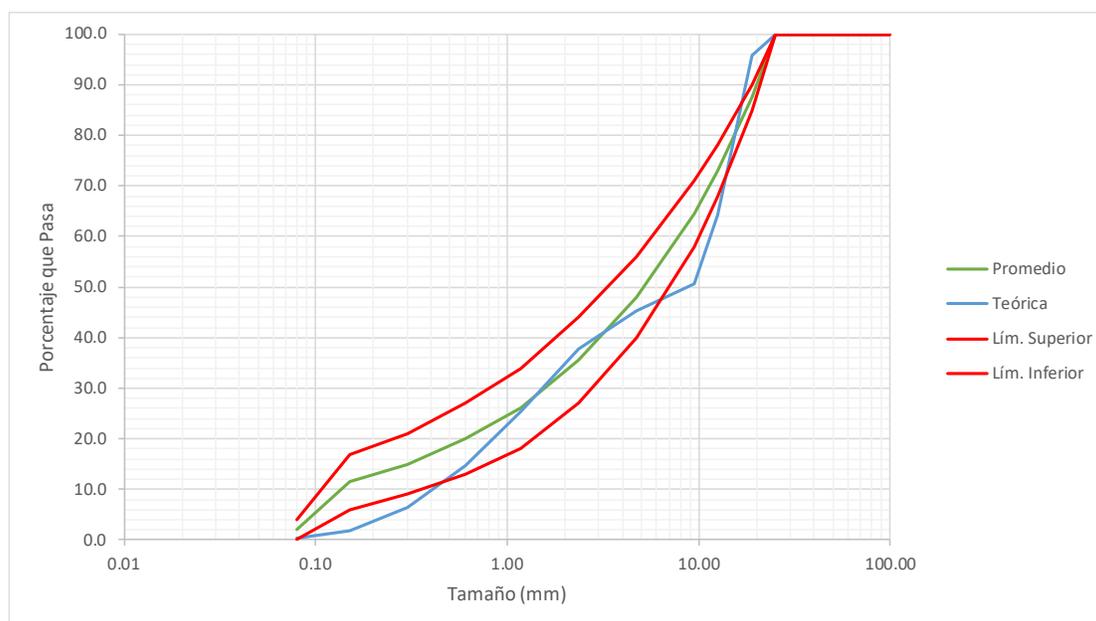
Para llevar a cabo el montaje experimental se realizaron 15 muestras, hechas a partir del diseño de mezcla generado. Cada muestra estuvo conformada por 11 cilindros de 200mm de alto y 100mm

de diámetro. En la tabla (19) se muestran los resultados de los ensayos realizados para cada mezcla en su estado fresco.

Tabla 19. Resultados de los ensayos del concreto en estado fresco. Elaboración propia

N° DE MUESTRA	FECHA DE ELABORACIÓN	ASENTAMIENTO (mm)	RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO	PH	PORCENTAJE DE AIRE (%)	TEMPERATURA (°C)
M1	9/11/2021	200	2.4702	12.00	-	21
M2	9/11/2021	190	2.4553	12.00	-	22
M3	10/11/2021	200	2.4453	12.00	-	22
M4	10/11/2021	220	2.4354	12.00	-	22
M5	11/11/2021	230	2.4254	12.00	-	24
M6	11/11/2021	205	2.4254	12.00	-	23
M7	13/11/2021	210	2.4553	12.00	-	22
M8	13/11/2021	210	2.4602	12.00	-	23
M9	17/11/2021	200	2.4105	12.00	-	21
M10	17/11/2021	220	2.4205	12.00	-	26
M11	22/11/2021	210	2.4404	12.00	-	20
M12	22/11/2021	200	2.4503	12.00	-	21
M13	24/11/2021	210	2.4503	12.00	-	21
M14	24/11/2021	200	2.4702	12.00	-	20
M15	24/11/2021	195	2.4354	12.00	-	22

Las muestras M1 y M2 se realizaron con las proporciones obtenidas del diseño, cuya gráfica de dosificación es la Gráfica (3).

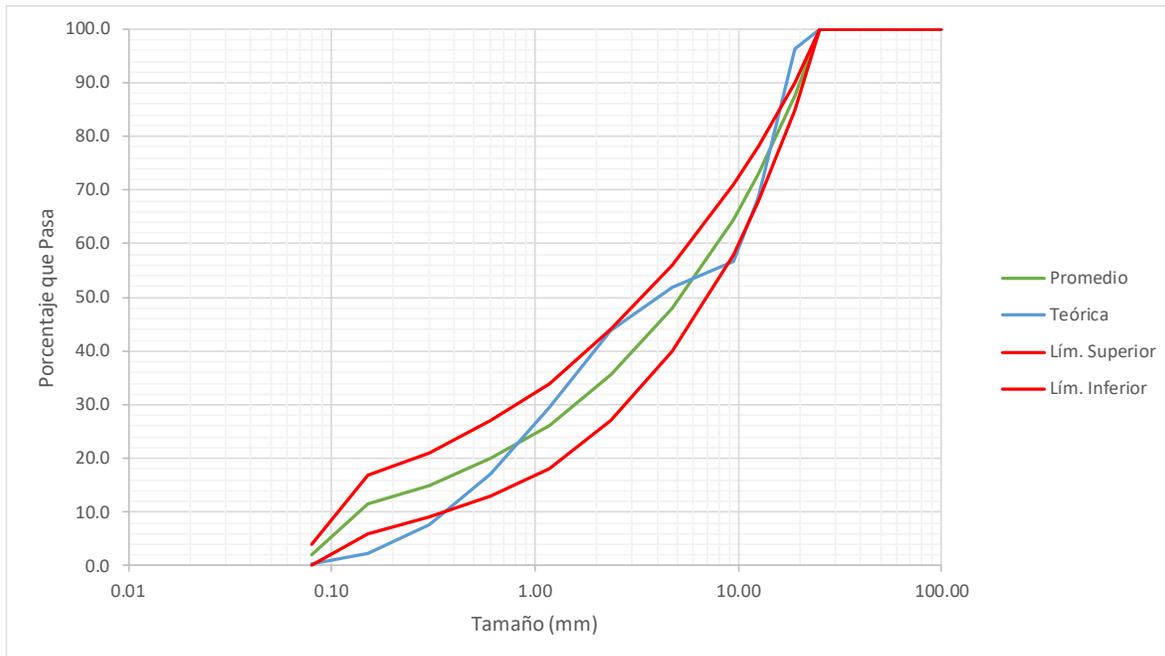


Gráfica 3. Proporción de diseño. Elaboración propia

En la gráfica se puede observar un pico que hace que la curva no se vea continua, pero éste se debe a que para la gradación de la grava no se obtuvieron valores en los tamices del n°16 al n°100. Al

momento de realizar los montajes de ambas muestras, se observó que la mezcla presentaba mucha grava y se dificultaba su trabajabilidad, así que se optó por modificar las proporciones. Estas modificaciones se realizaron de manera paulatina y tanteando la mejor proporción de acuerdo a qué tan trabajables se notaran las mezclas.

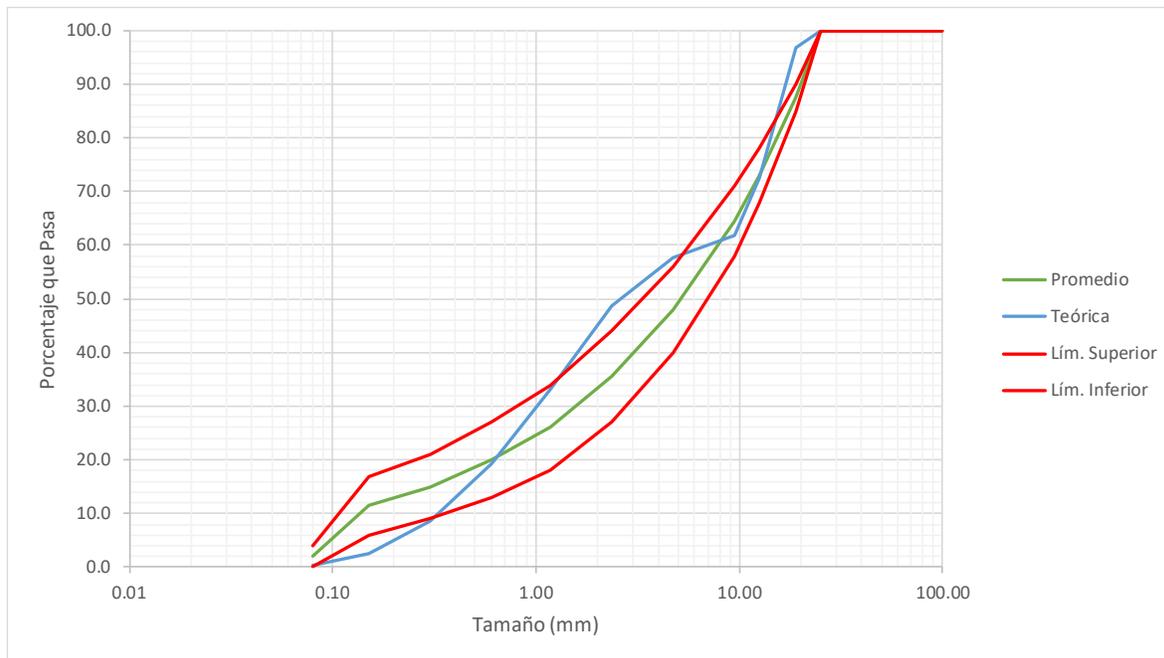
Para las muestras M3 y M4 se usó una proporción de 1:2.48:2.48 (Gráfica 4).



Gráfica 4. Proporción modificada a 1:2.48:2.48. Elaboración propia

Con esta proporción se evidenció un cambio en la trabajabilidad, pero aún se sentía pesado y difícil de manejar, por lo que se decidió realizar una tercera modificación.

A partir de la muestra M5 se trabajó con una proporción de 1:2.58:2.38 (Gráfica 5).



Gráfica 5. Proporción modificada a 1:2.58:2.38. Elaboración propia

Esta fue la proporción que logró darle una manejabilidad adecuada a las mezclas.

Volviendo a la tabla (19), se puede observar que los asentamientos obtenidos en cada una de las muestras supera en varios centímetros el asentamiento de diseño. Esto se podría explicar con el efecto que tiene el aditivo usado en las mezclas que, como ya se mencionó, proporciona cierta fluidez al concreto; o bien se adicionó a las mezclas más agua de la necesaria. Sin embargo, más adelante se podrá comprobar que esto no afectó la resistencia del concreto.

En la misma tabla se observa el rendimiento volumétrico. Comparados con el peso por metro cúbico calculado al momento de realizar el diseño (2441.83kg/m³), todas las muestras arrojan valores acordes.

El PH para todas las muestras fue de 12, valor que corresponde a la teoría.

La temperatura se encuentra entre 20°C y 26°C. Son temperaturas acordes, teniendo en cuenta que la temperatura de un concreto debería estar en el rango de 19°C a 35°C en su estado fresco (Claros, s.f).

Como se observa en la tabla (19), ninguna muestra cuenta con ensayo de contenido de aire. Esta situación se debió a que en el momento en que se montaron las pruebas del diseño, en la empresa no se contaba con un medidor de contenido de aire, a causa de un imprevisto.

5.4. Ensayo del concreto endurecido

Luego de que los cilindros de concreto fraguaron, fueron depositados en los tanques de curado. De los 11 cilindros que conformaban cada muestra, 3 fueron fallados a la edad de 3 días, 3 a 7 días y 3 a 28 días. Los 2 cilindros restantes fueron dejados para fallar a 90 días, solo en caso de que a 28 días no se alcanzara la resistencia esperada. La norma NSR-10, en su título C (2010), estipula que a los 28 días la resistencia promedio de los tres especímenes debe ser de mínimo el 85% de la resistencia esperada, siendo el 100% el ideal a alcanzar; sin embargo, como estándar interno de calidad, para este proyecto se esperó que la resistencia promedio a los 3 días fuera del 55%, a los 7 días del 80% y a los 28 días fuera de 110% de la resistencia esperada.

La tabla (20) condensa los resultados promedio de los fallos a las 3 edades evaluadas. Los resultados detallados a 28 días se mostrarán en una tabla diferente, puesto que en base a estos se realizó el análisis estadístico.

Tabla 20. Resultados promedio de la resistencia a 3, 7 y 28 días. Elaboración propia

N° DE MUESTRA	PROMEDIO 3 DÍAS (MPa)	R3 (%)	PROMEDIO 7 DÍAS (KN)	R7 (%)	PROMEDIO 28 DÍAS (KN)	R28 (%)
M1	31.39	89.69%	39.03	111.50%	45.42	129.77%
M2	32.66	93.32%	38.35	109.58%	44.24	126.40%
M3	33.09	94.55%	42.09	120.27%	49.18	140.50%
M4	29.49	84.27%	38.39	109.69%	44.03	125.80%
M5	25.06	71.59%	36.57	104.49%	43.67	124.76%
M6	24.50	70.01%	38.17	109.06%	45.13	128.93%
M7			40.64	116.12%	48.44	138.41%
M8			42.80	122.28%	49.21	140.59%
M9	34.28	97.94%	39.68	113.37%	46.24	132.12%
M10	34.12	97.48%	39.30	112.30%	46.53	132.94%
M11	32.96	94.16%	38.74	110.69%	48.25	137.85%
M12	33.23	94.94%	41.28	117.93%	48.50	138.56%
M13	35.15	100.42%	45.17	129.07%	50.86	145.31%
M14	36.46	104.16%	46.16	131.90%	52.96	151.30%
M15	35.89	102.53%	44.25	126.43%	50.76	145.02%

Al observar los porcentajes de las resistencias promedio obtenidas respecto a la resistencia especificada, se nota que superaron ampliamente las expectativas, pues a 3 días se encuentran entre 70% y 104%, a 7 días entre 109% y 131%, y a los 28 días alcanzó hasta el 151% de la resistencia especificada. Además, ninguna de las muestras se encontró por debajo del porcentaje esperado. Se hace necesario comentar, además, que las muestras M7 y M8 no presentaron fallos a 3 días, esto porque el día de fallo coincidía con un festivo, así que se decidió no elaborar cilindros para fallar a dicha edad.

5.5. Análisis estadístico

Después de haber obtenido los resultados de las resistencias alcanzadas por las 15 muestras, se tomaron los datos a la edad de 28 días, para a partir de estos realizar un análisis estadístico, basado en los lineamientos de la norma NTC 2275 (1997).

Tabla 21. Datos de resistencia de las muestras de concreto de 35 MPa diseñado. Elaboración propia

EVALUACIÓN ESTADÍSTICA CONCRETO 35MPa								
Nº	MUESTRA	FECHA DE ELABORACIÓN	C1	C2	C3	PROMEDIO	PROMEDIO MOVIL	RANGO
1	M1	9/11/2021	46.15	46.05	44.06	45.42		2.09
2	M2	9/11/2021	43.88	43.87	44.97	44.24		1.10
3	M3	10/11/2021	50.17	48.92	48.44	49.18	46.28	1.73
4	M4	10/11/2021	44.03	43.83	44.23	44.03	45.82	0.40
5	M5	11/11/2021	44.08	44.24	42.68	43.67	45.62	1.56
6	M6	11/11/2021	45.89	44.83	44.66	45.13	44.27	1.23
7	M7	13/11/2021	48.80	48.74	47.79	48.44	45.75	1.01
8	M8	13/11/2021	50.17	50.62	46.83	49.21	47.59	3.79
9	M9	17/11/2021	44.12	47.76	46.85	46.24	47.96	3.64
10	M10	17/11/2021	47.71	45.69	46.19	46.53	47.33	2.02
11	M11	22/11/2021	47.68	47.79	49.27	48.25	47.01	1.59
12	M12	22/11/2021	49.01	47.33	49.15	48.50	47.76	1.82
13	M13	24/11/2021	50.45	51.68	50.45	50.86	49.20	1.23
14	M14	24/11/2021	52.99	53.44	52.44	52.96	50.77	1.00
15	M15	24/11/2021	51.61	49.16	51.50	50.76	51.52	2.45

En la tabla (21) se presentan los resultados de las resistencias de los cilindros individuales a los 28 días de edad, el promedio de estos, los resultados del promedio móvil calculado cada 3 muestras consecutivas, y el rango, que muestra la diferencia entre los cilindros de cada muestra.

Usando esta información se obtuvieron los datos consignados en la tabla (22).

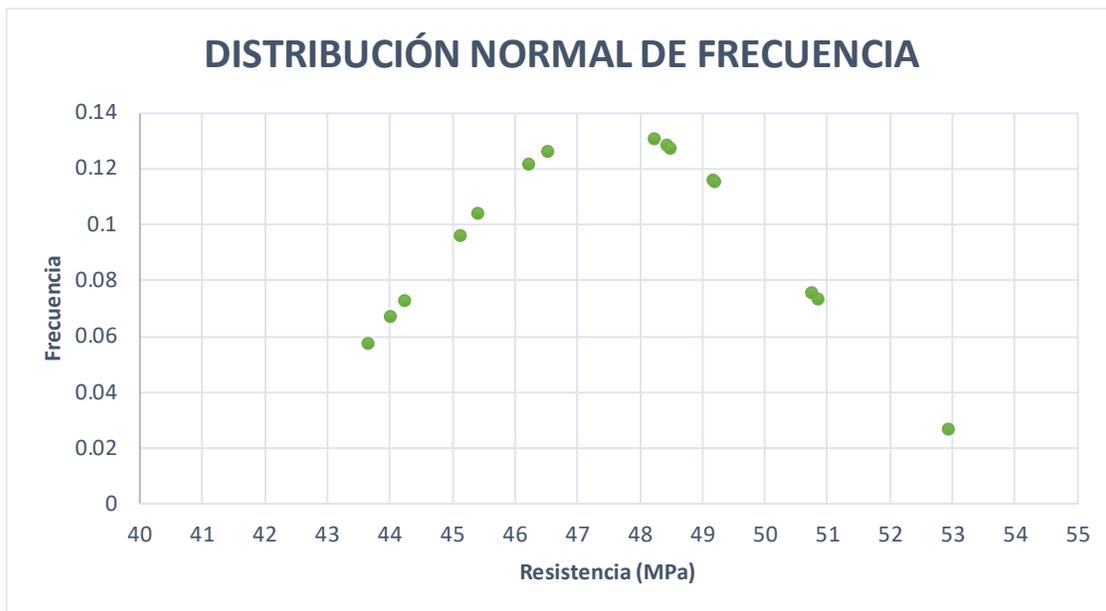
Tabla 22. Resultados estadísticos obtenidos para el concreto de 35 MPa diseñado. Elaboración propia

RESULTADOS	
Número de datos	15
Resistencia promedio (MPa)	47.56
Desviación estándar mezcla a mezcla	2.80
Rango promedio	1.78
Desviación estándar dentro del ensayo	1.05
Desviación estándar total	2.99
Coefficiente de variación (%)	6.28
f'c (MPa)	35
f'cr (MPa)	38.83
CALIFICACIÓN SEGÚN NTC 2275	MUY BUENO

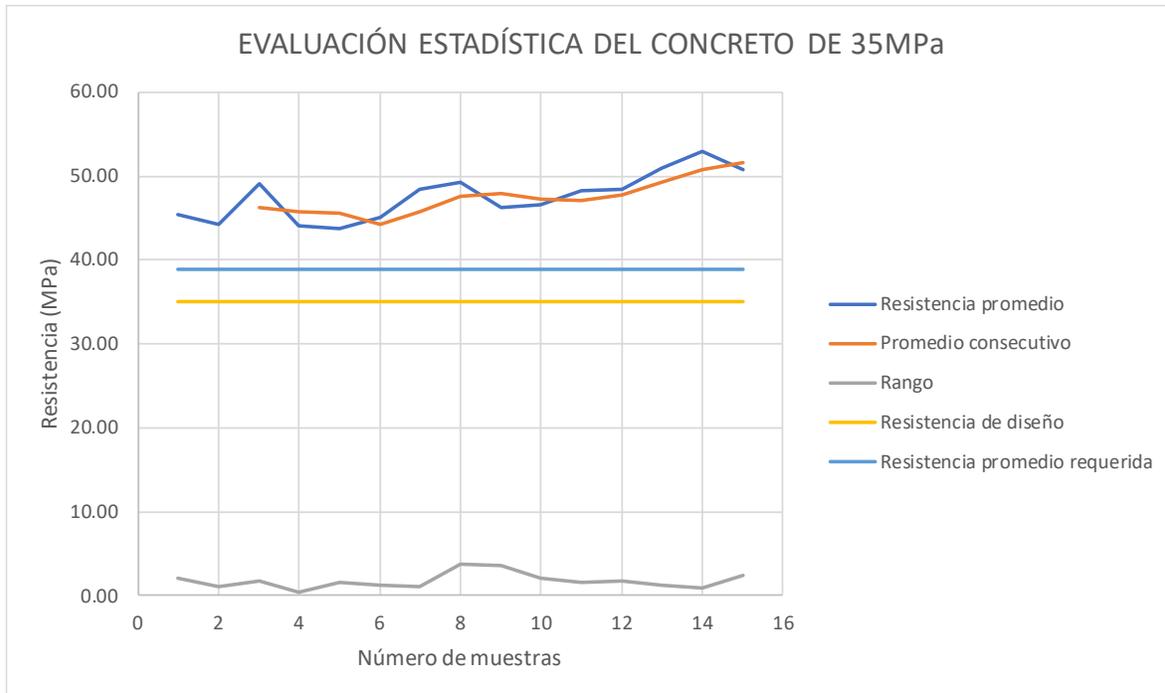
Se observa que la resistencia promedio obtenida es de aproximadamente 136%, valor que supera ampliamente la expectativa de 110% de la resistencia especificada. También se presenta un rango promedio aceptable, pues demuestra que las diferencias entre los resultados de los cilindros son bajas. La desviación estándar es baja, lo que indica que no se presentan grandes desviaciones entre las diferentes muestras. Las bajas desviaciones también se demuestran con el coeficiente de variación, el cual indica que la desviación estándar representa un 6% de la resistencia promedio.

De acuerdo a la norma NTC 2275, la calificación del diseño de mezcla es Muy Bueno, basada en la tabla (11), que indica que una desviación que se encuentre entre 2.5 y 3.5 recibe dicha calificación.

A continuación, se muestran las gráficas de distribución normal de frecuencia (Gráfica 6) y la evaluación estadística del concreto diseñado (Gráfica 7).



Gráfica 6. Distribución normal de frecuencia para el concreto de 35 MPa diseñado. Elaboración propia



Gráfica 7. Evaluación estadística del concreto de 35 MPa diseñado

En la gráfica (6) se observa que la mayoría de los datos se encuentran agrupados cerca a la media y que la curva se asemeja a una campana de Gauss, lo que indica un correcto control de las variaciones dentro de los ensayos. En la gráfica (7) se comprueba que, efectivamente, ninguna de las muestras fue menor a la resistencia especificada, y así mismo fueron superiores a la resistencia promedio requerida (f'_{cr}). Esto indica que el diseño propuesto cumple con los estándares de calidad requeridos por las normas regentes en el país.

6. Conclusiones

Dentro de los resultados obtenidos, el más destacable es que el diseño que se propuso es efectivo y cumple con los estándares de calidad impuestos por las normas. Esto se evidencia al superar ampliamente la resistencia que se esperaba, y al notar que no se presentan grandes variaciones entre las muestras tomadas.

El agregado fino usado es apto para concretos que no estén expuestos a abrasión, pues cumple con los lineamientos dictados por la norma NTC 174; sin embargo, si el concreto fuera diseñado para ser sometido a agentes abrasivos, se tendría que buscar otros agregados finos, puesto que en este caso el usado ya no cumpliría. El cambio de material implicaría también el cambio de diseño, por lo cual no sería posible utilizar el diseño presentado anteriormente.

En cuanto al agregado grueso, sería ideal un tamaño un poco menor, puesto que, si bien la resistencia del concreto no se vio afectada, la trabajabilidad del mismo sí. Por esta razón se recomienda un agregado más homogéneo.

Al momento de presentar los análisis estadísticos del concreto, fue notorio que se presentaron bajas desviaciones entre las muestras. Esto podría explicarse debido a que una sola persona fue la encargada de realizar los especímenes de las muestras. De haber participado varios laboratoristas, cabría esperar desviaciones más altas, debido a que es casi imposible garantizar que se aplicaría la misma fuerza y técnica para todos los especímenes.

Todo lo anterior se realizó aplicando los conocimientos obtenidos tanto en la práctica como en los años de universidad, y su elaboración contribuyó ampliamente al aumento del conocimiento general y a afianzar el mismo, entendiendo que, si bien es un trabajo académico, posee el potencial y la capacidad para tener aplicabilidad y poder ser usado en el ámbito profesional.

7. Referencias Bibliográficas

- American Society for Testing Materials. (Febrero 1 de 2020). *Standard Definition of Terms Relating to Concrete and Concrete Aggregates*. ASTM C125.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo-Resistente, NSR-10*. Título C.
- Agüero, R. R; Korzenowski, C; Aguirre, J.R.Y; Campos Filho, A; Silva Filho, L.C.P da; Mallmann, C.S. (Agosto de 2019). Experimental study of concrete mixtures to produce UHPRC using sustainable Brazilians materials. *IBRACON Structures and Materials Journal*. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952019000400004>
- Abanto, F. (s.f). Tecnología del Concreto. *Editorial San Marcos*. Lima-Perú. <https://www.udocz.com/co/read/21543/tecnologia-del-concreto-teoria-y-problemas-ing-flavio-abanto-castillo>
- Claros, E. (s.f). ¿Cuál debe ser la temperatura máxima del concreto fresco?. *360 en concreto*. <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/categoria/normatividad/191cual-debe-ser-la-temperatura-maxima-del-concreto-fresco#:~:text=La%20temperatura%20del%20concreto%20en,durante%20el%20proceso%20de%20vaciado>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2018). *Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos – NTC 77*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2019). *Método de ensayo para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 µm (No. 200) en agregados minerales – NTC 78*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2019). *Método de ensayo para la determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados – NTC 92*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2005). *Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto – NTC 127*
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2018). *Especificaciones de los agregados para concreto – NTC 174*

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2019). *Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso* – NTC 176
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2020). *Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino* – NTC 237
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2021). *Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto* – NTC 396
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2021). *Método de ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto* – NTC 673
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2021). *Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio* – NTC 1377
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2013). *Método de ensayo para determinar la densidad (masa unitaria), el rendimiento y el contenido de aire por gravimetría del concreto* – NTC 1926
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (1997). *Procedimiento recomendado para la evaluación de los ensayos de resistencia del concreto* – NTC 2275
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC. (2013). *Método de ensayo para determinar la temperatura del concreto fresco de cemento hidráulico* – NTC 3357
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, IMCYC. (Octubre de 2004). *Proporcionamiento y mezclado del concreto*. <http://www.imcyc.com/cyt/octubre04/CONCEPTOS.pdf>
- Mather, B; Ozyildirim, C. *Cartilla del Concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, IMCYC. <https://es.slideshare.net/flaviorosarioflores/cartilla-del-concreto>
- Ochoa-Gallardo, Y. (Septiembre de 2018). *Evaluación experimental de las arenas de Cerromochó y Chulucanas y su influencia en el concreto*. Tesis de grado. Universidad de Piura. Piura-Perú. <https://www.udocz.com/co/read/21543/tecnologia-del-concreto-teoria-y-problemas-ing-flavio-abanto-castillo>

PSI Concreto. (Enero 22 de 2021). Concreto de alta resistencia: características y usos en contextos industriales. *PSI Concreto*. [https://psiconcreto.com/concreto-de-alta-resistencia/#:~:text=El%20concreto%20de%20alta%20resistencia%20es%20un%20tipo%20de%20concreto,o%2040%20megapascales%20\(MPa\)](https://psiconcreto.com/concreto-de-alta-resistencia/#:~:text=El%20concreto%20de%20alta%20resistencia%20es%20un%20tipo%20de%20concreto,o%2040%20megapascales%20(MPa))

Rivva, E. (1992). *Tecnología del Concreto: Diseño de Mezclas*. https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/48687741/223658078-Diseno-de-Mezclas-Enrique-Rivva-Lopez-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1628404332&Signature=dbTSrWBZJqIsA51QTua-43MP-vpk6rnhuBEXWXL0e-krLUxxoK5~1YDAABSehcXaJ2migJKqA8U2KB2NG0XCsPIXc12Wsbh~YAbxOnNAZDmYd4ys04ebQy6w7H4NPf0vuBYgdWCAtmrF6hjq9rCF4qauzDqXSLP7lzxrxOWeGeW3-eU2daQX6SXvaziH63YLEKvuyE82xnhaizKo7Yq0C1KruM70lpamjXb~rMZXDX5BOrvi58UM4Ic3oQGlli~zUWx0CHJ03fPoNWfAe8AoryNsfMzH~rQqFp9PTVjLHd8xz4DJ3zE-Sfnmm3fd13Cz7wOddV~sGme~3Vo3m8gs2A__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

Rivera, G. (s.f). Dosificación de Mezclas de Concreto. *Concreto Simple, Capítulo 8*. <https://es.slideshare.net/rubenparilaura/diseo-de-mezclas-de-concreto-aci-211-pdf-ingenieroscivileswebcom>

Sánchez, D. (2001). La tecnología del concreto y el mortero. *Bhandar Editores*

Sika. (Noviembre de 2017). *Hoja de Datos del producto, Sikaplast 5500*. https://col.sika.com/dms/getdocument.get/89224a6c-2a9a-3067-9d28-5edab158ca23/co-ht_SikaPlast-5500.pdf