

Cuantificación de la disminución en la resistencia a la compresión del concreto $f'c=215$ Kg/cm², al utilizar agregados de peña (Cantera La Roca y Arenera Dubai) de Boyacá como reemplazo total de los agregados de río (Arenera Chicamocha SAS) comúnmente empleados en el Área Metropolitana de Bucaramanga

Jonathan Bohorquez Galvis, Carlos Danilo Rodríguez Rodríguez

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Germán Hernando Acevedo Calderón

Msc. Ingeniería Estructural

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Civil

2022

Contenido

Introducción	13
1. Formulación del problema.....	14
1.1 Pregunta de investigación.....	15
2. Justificación	16
3. Objetivos.....	17
3.1 Objetivo general	17
3.2 Objetivos específicos.....	17
4. Marco referencial.....	17
4.1 Antecedentes	18
4.2 Marco conceptual	20
4.2.1 Concreto.....	20
4.2.2 Composición del concreto.....	20
4.2.2.1 Agregados	21
4.2.2.2 Cemento.....	21
4.2.2.3 Agua.....	21
4.2.3 Propiedades físicas y mecánicas del concreto	22
4.2.3.1 Manejabilidad	22
4.2.3.2 Resistencia a la compresión ($f'c$).....	22
4.2.4 Herramientas estadísticas	22
4.2.4.1 Media aritmética o promedio.....	23

4.2.4.2	Mediana	23
4.2.4.3	Varianza y desviación estándar	23
4.2.4.4	Coefficiente de variación	23
4.3	Marco teórico	23
4.4	Marco normativo	28
4.4.1	NTC 174 – Especificaciones de los agregados para concreto	28
4.4.1.1	Definición	28
4.4.2	NTC 77 – Tamizado de los agregados finos y gruesos.....	28
4.4.2.1	Definición	28
4.4.2.2	Método.....	28
4.4.3	NTC 237 – Densidad relativa y absorción del agregado fino	29
4.4.3.1	Definición	29
4.4.3.2	Método.....	29
4.4.4	NTC 176 – Densidad relativa y absorción del agregado grueso.....	29
4.4.4.1	Método.....	29
4.4.5	NTC 92 – Densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados	29
4.4.5.1	Definición	29
4.4.5.2	Método.....	30
4.4.6	NTC 1776 – Contenido total de humedad por secado de los agregados	30
4.4.6.1	Definición	30
4.4.6.2	Método.....	30

4.4.7	INV E – 133 – Equivalente de arena en suelos y agregado fino.....	30
4.4.7.1	Definición	30
4.4.7.2	Método.....	30
4.4.8	NTC 93 – Resistencia al desgaste por abrasión de agregados gruesos.....	30
4.4.8.1	Definición	30
4.4.8.2	Método.....	30
4.4.9	NTC 1377 – Elaboración y curado de especímenes de concreto.....	31
4.4.9.1	Método.....	31
4.4.10	NTC 396 – Manejabilidad del concreto.....	31
4.4.10.1	Método.....	31
4.4.11	NTC 673 – Resistencia a la compresión del concreto	31
4.4.11.1	Método.....	31
5.	Metodología.....	31
5.1	Tipo de investigación	31
5.2	Recolección de datos.....	32
5.3	Procedimiento.....	32
5.3.1	Fase 1: Caracterización de los agregados pétreos.....	32
5.3.1.1	Actividad 1. Caracterización de agregados pétreos.....	32
5.3.2	Fase 2: Elaboración y experimentación.....	33
5.3.2.1	Actividad 2. Diseñar mezcla de concreto de $f^c = 215 \text{ Kg/cm}^2$	33
5.3.2.2	Actividad 3. Fabricar y ensayar especímenes cilíndricos de concreto	34

6.	Desarrollo y resultados	34
6.1	Fuentes de los agregados pétreos	35
6.1.1	Cantera de río (Arenera Chicamocha S.A.S)	35
6.1.2	Canteras de peña (Cantera La Roca y Arenera Dubai)	35
6.2	Fase 1: Caracterización de los agregados pétreos	36
6.2.1	Actividad 1. Caracterización de agregados pétreos	36
6.2.1.1	Análisis granulométrico.....	36
6.2.1.2	Densidad volumétrica y absorción	39
6.2.1.3	Masa unitaria suelta y compactada	42
6.2.1.4	Humedad.....	45
6.2.1.5	Equivalente de arena y resistencia al desgaste	46
6.2.1.6	Resultados de la actividad 1	47
1.1.1.1.1	Curvas granulométricas	47
6.3	Fase 2. Elaboración y experimentación.....	52
6.3.1	Actividad 2. Diseñar mezcla de concreto $f'c = 215 \text{ Kg/cm}^2$	52
6.3.1.1	Paso 1. Selección del asentamiento	52
6.3.1.2	Paso 2. Selección del tamaño máximo del agregado.....	53
6.3.1.3	Paso 3. Estimación del contenido de agua en litros.....	53
6.3.1.4	Paso 4. Determinación de la resistencia a diseño	53
6.3.1.5	Paso 5. Selección de la relación agua/cemento	54
6.3.1.6	Paso 6. Cálculo del contenido de cemento	54

6.3.1.7	Paso 7. Estimación del contenido de agregado grueso.....	55
6.3.1.8	Paso 8. Estimación del contenido del agregado fino	56
6.3.1.9	Paso 9. Proporciones iniciales	56
6.3.1.10	Paso 10. Ajuste por humedad de los agregados.....	57
6.3.1.11	Resultados de la actividad 2	57
6.3.2	Actividad 3. Fabricar y ensayar especímenes cilíndricos de concreto.....	57
6.3.2.1	Dosificación de los materiales.....	58
6.3.2.2	Preparación de los materiales	59
6.3.2.3	Mezclado y vaciado	61
6.3.2.4	Desencofrado y curado	64
6.3.2.5	Ensayos de resistencia a la compresión	65
6.3.2.6	Resultados de la actividad 3	67
7.	Discusión	74
7.1	Trabajabilidad.....	74
7.2	Resistencia a la compresión	75
8.	Conclusiones.....	80
	Referencias.....	82
	Apéndices.....	85

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Formulas representativas de las herramientas estadísticas</i>	23
Tabla 2. <i>Ensayos requeridos para la caracterización de agregados</i>	33
Tabla 3. <i>Peso retenido en cada tamiz, grava AR</i>	37
Tabla 4. <i>Pesos retenidos en cada tamiz, grava AP</i>	38
Tabla 5. <i>Pesos retenidos en cada tamiz, arena AR</i>	38
Tabla 6. <i>Pesos retenidos en cada tamiz, arena AP</i>	39
Tabla 7. <i>Propiedades físicas y mecánicas, grava AR y AP</i>	50
Tabla 8. <i>Propiedades físicas, arena AR y AP</i>	51
Tabla 9. <i>Consistencia de diseño</i>	52
Tabla 10. <i>Cantidad de agua según asentamiento de diseño</i>	53
Tabla 11. <i>Resistencia de diseño</i>	54
Tabla 12. <i>Relación agua – cemento de diseño en peso</i>	54
Tabla 13. <i>Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto</i>	55
Tabla 14. <i>Dosificación estándar</i>	56
Tabla 15. <i>Masa de cada material por m³, dosificación parcial</i>	56
Tabla 16. <i>Masa de cada material por m³, dosificación ajustada por humedad</i>	57
Tabla 17. <i>Volumen requerido de mezclas CAR y CAP</i>	58
Tabla 18. <i>Dosificación para el volumen requerido de mezclas CAR y CAP</i>	58
Tabla 19. <i>Asentamiento de las mezclas de concreto CAR y CAP</i>	68
Tabla 20. <i>Caracterización de los especímenes y f'c, concreto CAR</i>	68
Tabla 21. <i>Caracterización de los especímenes y f'c, concreto CAP</i>	71
Tabla 22. <i>Datos estadísticos (S, CV y f'c promedio), concreto CAR</i>	76
Tabla 23. <i>Datos estadísticos (S, CV y f'c promedio), concreto CAP</i>	77
Tabla 24. <i>Porcentaje de resistencia obtenido, concreto CAR y CAP</i>	78

Lista de figuras

Figura 1. <i>Clasificación del concreto según su consistencia</i>	25
Figura 2. <i>Curva de resistencia a la compresión respecto al tiempo</i>	26
Figura 3. <i>Fases y actividades de la investigación</i>	32
Figura 4. <i>Arenera Chicamocha S.A.S, Piedecuesta – Santander</i>	35
Figura 5. <i>Ubicación, Cantera La Roca & Arenera Dubai</i>	36
Figura 6. <i>Tamizado, grava AR</i>	37
Figura 7. <i>Tamizado, grava AP</i>	37
Figura 8. <i>Tamizado, arena AR</i>	38
Figura 9. <i>Tamizado, arena AP</i>	39
Figura 10. <i>Muestra saturada, seca y masa aparente, grava AR</i>	40
Figura 11. <i>Muestra saturada, secada y masa aparente, grava AP</i>	40
Figura 12. <i>Secado superficial, ensayo del cono y agitación, arena AR</i>	41
Figura 13. <i>Secado superficial, ensayo del cono y del picnómetro, grava AP</i>	42
Figura 14. <i>Toma de muestra y masa, grava AR</i>	43
Figura 15. <i>Llenado del molde y masa, grava AP</i>	43
Figura 16. <i>Llenado, compactación y enrazado de la muestra, arena AR</i>	44
Figura 17. <i>Toma de masa y compactación de la muestra, arena AP</i>	44
Figura 18. <i>Toma de masa y secado, grava y arena AR</i>	45
Figura 19. <i>Toma de masa y secado, grava y arena AP</i>	46
Figura 20. <i>Curva granulométrica, grava AR</i>	47
Figura 21. <i>Curva granulométrica, grava AP</i>	48
Figura 22. <i>Curva granulométrica, arena AR</i>	49
Figura 23. <i>Curva granulométrica, arena AP</i>	49
Figura 24. <i>Preparación de arena, grava y cemento, concreto CAR</i>	59

Figura 25. <i>Preparación de arena, grava y cemento, concreto CAP</i>	59
Figura 26. <i>Dosificación de los materiales, concreto CAR</i>	60
Figura 27. <i>Dosificación de los materiales, concreto CAP</i>	60
Figura 28. <i>Mezcladora mecánica y moldes cilíndricos</i>	61
Figura 29. <i>Mezclado de los materiales, concreto CAR</i>	61
Figura 30. <i>Mezclado de los materiales, concreto CAP</i>	62
Figura 31. <i>Ensayo de asentamiento, concreto CAR</i>	63
Figura 32. <i>Ensayo de asentamiento, concreto CAP</i>	63
Figura 33. <i>Vaciado de la mezcla, concreto CAR y CAP, respectivamente</i>	64
Figura 34. <i>Desencofrado y curado de especímenes, concreto CAR</i>	64
Figura 35. <i>Desencofrado y curado de especímenes, concreto CAP</i>	65
Figura 36. <i>Caracterización geométrica y masa de especímenes, concreto CAR</i>	65
Figura 37. <i>Caracterización geométrica y masa de especímenes, concreto CAP</i>	66
Figura 38. <i>Automax E-Modulus Automatic Console, Laboratorio USTABUCA</i>	66
Figura 39. <i>Ensayo de resistencia a la compresión</i>	67
Figura 40. <i>Curva $f'c$ vs t - 3 días, concreto CAR</i>	69
Figura 41. <i>Curva $f'c$ vs t - 7 días, concreto CAR</i>	69
Figura 42. <i>Curva $f'c$ vs t - 14 días, concreto CAR</i>	70
Figura 43. <i>Curva $f'c$ vs t - 28 días, concreto CAR</i>	70
Figura 44. <i>Curva $f'c$ vs t - 3 días, concreto CAP</i>	72
Figura 45. <i>Curva $f'c$ vs t - 7 días, concreto CAP</i>	72
Figura 46. <i>Curva $f'c$ vs t - 14 días, concreto CAP</i>	73
Figura 47. <i>Curva $f'c$ vs t - 28 días, concreto CAP</i>	73
Figura 48. <i>Finos pasantes de la malla No. 200, arena AP</i>	75
Figura 49. <i>Diagrama de barras comparativo, $f'c$ respecto al tiempo</i>	78

Figura 50. *Grafica comparativa de porcentaje obtenido respecto al tiempo.....79*

Resumen

La búsqueda de agregados pétreos alternativos a los utilizados con frecuencia ha tomado gran relevancia en el campo de la construcción, debido a la baja oferta y aumento en los costos de agregados de río en épocas de sequía. Por lo cual, en el presente trabajo de investigación se busca cuantificar la reducción en la resistencia a la compresión del concreto, al reemplazar los agregados de río comúnmente empleados en el área metropolitana de Bucaramanga (concreto CAR) por materiales de peña comercializados en el municipio de Barbosa – Santander (concreto CAP). Considerando lo anterior, en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás – Seccional Bucaramanga se lleva a cabo la caracterización de los agregados y el diseño de mezcla estándar planteado ($f'c=215 \text{ Kg/cm}^2$) en base a la metodología ACI. Posteriormente, se elaboran las mezclas de concreto CAR y CAP, la fundida de los especímenes cilíndricos y ensayos de resistencia a los 3, 7, 14 y 28 días de curado. Finalmente, se concluye que las tipologías de agregados pétreos en estudio no cumplen en su totalidad con parámetros normativos como granulometrías, equivalentes de arena, módulos de finura, entre otros. De igual manera, al efectuar el reemplazo total de los agregados de río, el concreto pierde trabajabilidad en estado fresco y su resistencia a la compresión disminuye un 48% en su estado endurecido, en comparación con la mezcla estándar.

Palabras clave: agregados, concreto, propiedades de los materiales, esfuerzo de compresión

Abstract

The search for alternative stone aggregates to those frequently used has become highly relevant in the field of construction, due to the low offer and increased costs of river aggregates in times of drought. Therefore, in this research work we seek to quantify the reduction in the compressive strength of concrete, by replacing the river aggregates used in the metropolitan area of Bucaramanga (CAR concrete) by rock materials marketed in the municipality of Bucaramanga. Barbosa – Santander (concrete CAP). Considering the above, in the Civil Engineering Laboratory of the Santo Tomás University – Bucaramanga Section, the characterization of the aggregates is carried out and thus, the proposed standard mix design ($f_c=215 \text{ Kg/cm}^2$) based on the ICA methodology. Subsequently, the CAR and CAP concrete mixes are made, the casting of the cylindrical specimens and resistance tests at 3, 7, 14 and 28 days of curing. Finally, it is concluded that the typologies of stone aggregates under study do not fully comply with normative parameters such as grain sizes, sand equivalents, fineness modules, among others. Similarly, when carrying out the total replacement of the river aggregates, the concrete loses workability in its fresh state and its compressive strength decreases by 48% in its supported state, compared to the standard mix.

Keywords: aggregates, concrete, material properties, compressive stress

Introducción

El concreto es el material más utilizado en el sector de la construcción a nivel mundial, debido a factores como duración, facilidad en su fabricación, bajo costo y resistencia, siendo esta última la propiedad con la cual se suele juzgar la calidad de este material; así mismo, está compuesto principalmente por agregados pétreos (arenas y gravas), los cuales deben ser de gran calidad con el fin de garantizar la resistencia planteada en el diseño de la mezcla. [1], [2] Usualmente, en la fabricación de mezclas de concreto se emplean agregados pétreos extraídos en canteras de río; sin embargo, la obtención de estos se limita por temporadas de sequía cada vez más largas que afectan la adquisición de estos materiales, por lo cual, los estudios e investigaciones del sector ingenieril se deben enfocar en la búsqueda de nuevas fuentes que satisfagan la demanda de esta tipología de agregados. [3]

De acuerdo con investigaciones nacionales e internacionales, al utilizar agregados pétreos de peña en la fabricación de concreto, se evidencia una disminución en la resistencia a la compresión, en comparación con las mezclas de concreto elaboradas con materiales de río [3]–[5]. En base a lo anterior, el objeto del presente proyecto es determinar la disminución porcentual de la resistencia del concreto al reemplazar los agregados pétreos comúnmente usados en el área metropolitana de Bucaramanga, por materiales de peña usualmente comercializados en Barbosa – Santander.

Así mismo, con la revisión bibliográfica realizada no se encontraron estudios relacionados con la sustitución de materiales pétreos de río del área metropolitana de Bucaramanga por agregados naturales de otras procedencias. Sin embargo, la investigación con mayor similitud fue realizada en la Universidad Pontificia Bolivariana – Seccional Bucaramanga, la cual se fundamenta en la comparación de la calidad de agregados pétreos de fuentes aluviales del sector (río Chicamocha y río Suratá). [6]

1. Formulación del problema

En la actualidad, el sector de la construcción en países en vía de desarrollo no suele tener en cuenta la implementación de nuevas tecnologías enfocadas en el uso de materiales alternos a los comúnmente utilizados en mezclas de concreto, debido a factores económicos y técnicos, por lo cual, estos materiales deben proporcionar excelentes características.

En mezclas de concreto, es importante conocer las propiedades de los agregados pétreos según su procedencia, ya que estos conforman alrededor del 75% del volumen de dicha mezcla (la razón principal es su bajo costo), influyendo de manera determinante en las propiedades del concreto, tanto en estado fresco como endurecido. De esta manera, es fundamental escoger sitios de extracción que brinden materiales de excelente calidad, con el propósito de obtener un concreto que satisfaga la resistencia establecida en el diseño. [7]

Usualmente, las canteras de río ocupan la mayor demanda de este material, debido a que suelen proporcionar las mejores características en comparación con agregados naturales de diferente procedencia. Sin embargo, la obtención de materiales de río se limita por temporadas de sequía cada vez más frecuentes y prolongadas. En dichos ciclos el valor de este material aumenta considerablemente. Por lo tanto, con el transcurrir del tiempo ha surgido la necesidad de reemplazar los agregados pétreos de canteras de río por materiales cuya obtención no se vea limitada por temporadas de sequía, por ejemplo, los agregados de cantera de peña. [3]

De esta manera, surge el objeto de estudiar las propiedades físico-mecánicas de dos tipologías de concreto. La primera, empleando agregados pétreos extraídos en cantera de río del municipio de Piedecuesta – Santander (Arenera Chicamocha S.A.S – sector Pescadero), tomándola como mezcla de referencia; y la segunda, empleando agregados pétreos de cantera de peña comercializados usualmente en Barbosa – Santander (Cantera La Roca y Arenera Dubai).

En relación con lo anterior, según estudios realizados a especímenes de concreto con agregados pétreos de cantera de peña en el sector de Cajamarca - Perú, se obtuvo una resistencia a la compresión a los 28 días de 125,05 Kg/cm², mostrando una disminución de aproximadamente el 12% con respecto a los especímenes de concreto con agregados de río, partiendo de una dosificación estándar para concreto de 140 Kg/cm². [3]

De igual manera, estudios realizados por la Universidad Católica de Colombia en canteras cercanas a la ciudad de Bogotá, expresan que, al usar agregados gruesos de origen montañoso en la fabricación de probetas de concreto, la resistencia a la compresión disminuye alrededor del 13% con respecto a la mezcla de concreto con material de río, obteniendo valores de 2652 psi y asumiendo un diseño de mezcla para una resistencia de 3000 psi. [4]

De acuerdo con los antecedentes citados anteriormente, la implementación de materiales pétreos de peña representa una pérdida en la resistencia a la compresión del concreto. Por lo cual, con el estudio a desarrollar se busca determinar la disminución porcentual en la resistencia a la compresión del concreto al utilizar agregados pétreos de peña como reemplazo total de los materiales pétreos de río, sin realizar modificaciones en la mezcla. Con lo anterior se busca determinar si los agregados pétreos de canteras de peña podrían ser una alternativa como reemplazo total de materiales obtenidos en canteras de río, y así, suplir el aumento en la demanda de este material cuando sea requerido en el área metropolitana de Bucaramanga.

1.1 Pregunta de investigación

¿Cuál es la disminución porcentual de la resistencia a la compresión del concreto cuando hay un reemplazo total de los agregados pétreos de río (Arenera Chicamocha S.A.S) por agregados de peña (Cantera La Roca y Arenera Dubai), al implementar una dosificación estándar?

2. Justificación

El sector de la construcción del área metropolitana de Bucaramanga generalmente utiliza para la fabricación de concreto, agregados pétreos provenientes de canteras ubicadas en el sector, resaltando el río Chicamocha – sector Pescadero. Sin embargo, el caudal de dichas fuentes superficiales disminuye con el tiempo debido a ciclos de verano cada vez más recurrentes, influyendo directamente en la oferta y valor de los agregados pétreos en el mercado. De esta manera, es importante realizar un enfoque en la búsqueda de materiales naturales alternos.

Además, es importante mencionar que la resistencia a la compresión es la propiedad por la cual se suele juzgar la calidad del concreto. El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR – 10) cataloga esta propiedad como un factor de gran importancia en el diseño estructural de edificaciones en concreto, la cual depende en gran medida de las propiedades de los agregados pétreos. Por ende, se hace indispensable conocer a detalle las propiedades de estos. [8]

Para el desarrollo de la presente investigación, inicialmente se caracterizan los agregados pétreos con el fin de conocer sus propiedades físico-mecánicas ligadas a su lugar de origen o extracción. Posteriormente, se plantea una dosificación estándar con los agregados de río a partir de un diseño de mezcla en base a la metodología ACI para una resistencia de diseño de $f'_c=215 \text{ Kg/cm}^2$, y así, fabricar probetas cilíndricas de concreto y realizar la rotura de estas a diferentes edades de curado. Buscando analizar la variabilidad de las propiedades en estudio del concreto.

En conclusión, se busca comparar la resistencia a la compresión del concreto al usar agregados de río (Arenera Chicamocha S.A.S) y agregados de peña (Cantera La Roca y Cantera Dubai), con lo anterior, determinar la disminución porcentual en la resistencia y

verificar si los agregados de peña pueden ser una opción para el reemplazo total del agregado de río planteado, a partir de una dosificación estándar.

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Determinar la disminución en la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos en concreto, al utilizar agregados pétreos de peña como reemplazo total de materiales extraídos en canteras de río, siguiendo las Normas Técnicas Colombianas (NTC) e INVIAS.

3.2 Objetivos específicos

Determinar las propiedades y especificaciones de los agregados pétreos utilizados, siguiendo la NTC 174.

Diseñar mezclas de concreto de $f'c = 215 \text{ Kg/cm}^2$, según especificaciones para agregados pétreos de río (dosificación estándar), aplicando la metodología ACI.

Fabricar y ensayar especímenes cilíndricos de concreto, en base a la norma NTC 1377 y NTC 673, respectivamente.

Comparar y analizar estadísticamente la propiedad en estado endurecido (resistencia a la compresión) de las tipologías de concreto en estudio.

4. Marco referencial

Con el fin de conocer y analizar la resistencia a la compresión del concreto al sustituir agregados de río por agregados de peña, es necesario conocer experiencias nacionales e internacionales respecto a dicha variación de materiales, la composición y propiedades del

concreto con el fin de estudiar su comportamiento, el marco teórico pertinente y la normativa aplicable en nuestro país.

4.1 Antecedentes

A partir de la revisión bibliográfica realizada principalmente en repositorios de diversas universidades nacionales y extranjeras, se encontraron trabajos de grado e investigaciones de gran correlación con el objeto de estudio de la presente investigación; estos son:

“Evaluación de la influencia en la resistencia del concreto $f'c=140$ kg/cm², $f'c=175$ kg/cm² y $f'c=210$ kg/cm² usando agregado de río o agregado de cerro en Cajamarca”.

En este trabajo de grado, presentado en la Universidad Privada Del Norte de la ciudad de Cajamarca, Perú; se evidencia la influencia del origen de los agregados en la propiedad del concreto, resaltando, la trabajabilidad y la resistencia a la compresión. Este estudio implica el uso de agregados de río y agregados de peña en dos mezclas distintas, usando la misma cantidad de material, para diferentes resistencias, llevando a cabo una serie de laboratorios que incluyen el estudio de las propiedades de los agregados, y la fabricación de 432 probetas cilíndricas. [3]

En este estudio encontraron que al sustituir agregados de río por agregados de peña en mezclas de concreto, la resistencia a la compresión a los 28 días disminuye un 6,19% con respecto a los resultados de las mezclas de concreto con agregados de río para la resistencia de diseño $f'c=210$ Kg/cm², así mismo, la disminución con respecto a la resistencia de diseño fue de 32,03% a los 28 días de curado. [3]

“Identificación de la variación en la resistencia del concreto debido al origen del agregado grueso”.

En la Universidad Católica de Colombia de la ciudad de Bogotá, Colombia; se realizó una investigación donde se evidencio como la resistencia a la compresión del concreto es afectada al usar agregados gruesos de distinto origen. Para este estudio, se llevó a cabo una

serie de ensayos a los agregados estudiados, siendo estos de origen aluvial y origen montañoso, donde se conocieron sus principales características, para posteriormente, realizar un diseño de mezcla por el método ACI, para alcanzar una resistencia de 3000 psi, y al final, fabricar 20 probetas cilíndricas con cada tipo de agregado para realizar ensayos de compresión a los 7, 14 y 28 días. Los autores concluyen que, al emplear grava extraída de depósitos aluviales y agregados de peña, la resistencia a la compresión es de 3115 psi y 2652 psi, respectivamente, lo cual representa una disminución del 14,86% con respecto a la mezcla con material de río y 11,6% con respecto a la resistencia de diseño (3000 psi). [4]

“Influencia del agregado grueso sobre las propiedades del concreto de resistencia $f'c = 210 \text{ Kg/cm}^2$ ”.

En la Universidad Nacional de San Agustín de la ciudad de Arequipa, Perú; se llevó a cabo un proyecto donde estudiaron la influencia de las propiedades y forma del agregado grueso en el comportamiento del concreto, utilizando agregados pétreos de diferentes canteras del sector. De esta manera, realizaron un diseño de mezcla en base al método ACI para cada tipo de agregado y así obtener las cantidades necesarias de los materiales necesarios. Finalmente, se realizaron ensayos en probetas y viguetas para determinar la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado; resistencia a la tracción por compresión y resistencia a la tracción por flexión a los 28 días, y así, comparar los tipos de concreto en estudio. Finalmente, los autores concluyeron que los agregados de forma redondeada presentan mejor comportamiento mecánico (resistencia a la compresión) con respecto a los agregados triturados. [9]

“Influencia de agregados de diferentes procedencias y diseño de mezcla sobre la resistencia del concreto”

En este trabajo se muestra el resultado de una investigación, presentada en la Universidad Nacional de Huancavelica, Perú; donde se realizó un estudio referente a la

influencia de las características y propiedades de agregados de diferente origen, en la resistencia final del concreto. En el desarrollo de la investigación, se realizaron 3 diseños de mezclas para diferentes resistencias, en base a los resultados obtenidos en ensayos previamente realizados a los agregados empleados, para así, proceder a la fabricación y fallo de 90 probetas cilíndricas de concreto. Finalmente, los autores concluyen que, a los 28 días de curado las dos tipologías de agregado de río experimentan resultados superiores a la resistencia de diseño (210 Kg/cm²), siendo estos 220,70 Kg/cm² y 234,46 Kg/cm². [5]

4.2 Marco conceptual

En este apartado se abarcarán los conceptos más relevantes en la investigación. Como lo son el concreto, sus componentes, propiedades, y herramientas estadísticas acordes al análisis de los resultados.

4.2.1 Concreto

El concreto es un material compuesto, ya que es una mezcla homogénea de diversos materiales (cemento, agua y agregados pétreos), razón por la cual se le denomina roca artificial. Por su parte, los agregados de la mezcla (masa rocosa) se unen mediante una pasta endurecida resultante de una reacción química entre el cemento y agua, denominada hidratación. [2], [7], [10], [11]

4.2.2 Composición del concreto

Las propiedades del concreto dependen de las características de cada uno de los materiales utilizados en la mezcla, En consecuencia, es importante conceptualizar cada uno de los componentes y su función dentro del concreto.

4.2.2.1 Agregados. Los agregados son aquellos materiales granulares (arena, grava, roca triturada, etc.), naturales o artificiales, que se utilizan para formar concretos o morteros hidráulicos, estos materiales ocupan entre el 60% y 75% del volumen estos, la razón principal de usar en mayor porcentaje el material pétreo es su bajo costo en comparación con el cemento. [2], [7], [8], [12]

4.2.2.2 Cemento. Se denomina cemento a toda aquella sustancia de cualquier origen que tenga condiciones de pegante. Así mismo, el cemento portland es aquel material o producto obtenido al pulverizar Clinker con adición de yeso; este material se convierte en un cemento hidráulico a medida que fragua y endurece al reaccionar químicamente con agua [12]. Además, el cemento portland está compuesto principalmente por cal, sílice, alúmina y óxido de hierro. En el proceso de fabricación del cemento es necesario mezclar diferentes materiales que los contengan, ya que es extraño encontrarlos juntos en la naturaleza, por ejemplo, la caliza aporta cal y las arcillas aportan los óxidos de hierro y la alúmina [2].

4.2.2.3 Agua. El agua es un elemento de gran relevancia en mezclas de concreto, ya que es la encargada de desarrollar la capacidad ligante del cemento. Este líquido debe estar limpio, libre de sustancias como aceites y materia orgánica. Además, dos aspectos relevantes del agua en mezclas de concreto son: el proceso de hidratación y la relación agua/material cementoso (A/C). [2], [11], [12]

Por otro lado, la relación agua - cemento es el factor principal que afecta la resistencia del concreto. Dicha relación se considera inversamente proporcional a la resistencia del concreto, quiere decir la resistencia disminuye cuando se experimenta un aumento de la relación A/C. [12]

Así mismo, la hidratación de todo el material cementante se logra con cierta cantidad de agua (25% del cemento agregado, medido en peso). En mezclas en estado fresco, dicha cuantía genera un material inmanejable, por lo cual es necesario adicionar más agua para

proporcionar mayor fluidez a la mezcla, lo que facilita los procesos de colocación y compactación. [10]

4.2.3 Propiedades físicas y mecánicas del concreto

4.2.3.1 Manejabilidad. La manejabilidad, también denominada trabajabilidad, es aquella característica del concreto en estado fresco que puede definirse como la capacidad que tiene una mezcla para ser colocado en posición, compactado idóneamente y terminado sin segregación ni exudación. Por otro lado, La trabajabilidad está ligada con el termino plasticidad, que es aquella propiedad del concreto en estado fresco que permite dejarse moldear y cambiar de forma lentamente si se saca del encofrado. [2], [12]

4.2.3.2 Resistencia a la compresión ($f'c$). La resistencia a la compresión del concreto se define como el máximo esfuerzo promedio soportado por el material antes de llegar a la rotura. Dicho esfuerzo se logra a partir de ensayos de cilindros de concreto y la medida de esta propiedad se toma como el resultado del ensayo a la compresión a los 28 días. Además, la resistencia a la compresión es la principal propiedad mecánica del concreto en estado endurecido y la calidad de este material se juzga por dicha resistencia. [10], [12], [13]

4.2.4 Herramientas estadísticas

En el estudio de un conjunto de datos es necesario sintetizar la información, por lo cual, la estadística descriptiva es de gran utilidad. Así mismo, en el estudio de datos se puede observar el comportamiento de diferentes variables, como lo son las variables cuantitativas discretas, las cuales toman valores que generalmente cuantifican la ocurrencia de sucesos en particular. [14]

4.2.4.1 Media aritmética o promedio. La media aritmética (\bar{x}) es aquel punto de equilibrio en un conjunto de datos. [14]

4.2.4.2 Mediana. La mediana (Me) se define si el tamaño del conjunto (n) es par o impar. Si n es impar, la mediana es el elemento central; si n es par, la mediana es la media aritmética de los elementos centrales. [15]

4.2.4.3 Varianza y desviación estándar. La varianza (s^2) se define como la media aritmética de los cuadrados de las diferencias de los datos con su media aritmética [14]. La desviación estándar (s) se calcula como la raíz cuadrada de la varianza [15].

4.2.4.4 Coeficiente de variación. El coeficiente de variación (CV) señala el porcentaje de error promedio de medición dentro de un conjunto de datos, al contar con distintas mediciones de una misma magnitud; el CV es una medida relativa de variabilidad. [14]

Tabla 1. Formulas representativas de las herramientas estadísticas

Nombre	Símbolo	Formula representativa	Autor
Media aritmética	\bar{x}	$\frac{\sum_{i=1}^k x_i f(x_i)}{n}$	[14]
Variación muestral	s^2	$\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2 f(x_i)}{n - 1}$	[15]
Desviación estándar muestral	s	$\sqrt{s^2}$	[15]
Coeficiente de variación	CV	$\frac{s}{ \bar{x} }$	[14]

Nota: Análisis grupo investigador, adaptado de Peña (2015) y Matus (2010).

4.3 Marco teórico

En la actualidad, el concreto es el material disponible más importante y usado en la industria de la construcción debido a su resistencia, impermeabilidad, facilidad de producción y economía [2], [16]. Se produce acorde a diseños de mezclas dependientes de las propiedades

de los constituyentes seleccionados, donde se obtienen sus dosificaciones relativas con el fin de producir lo más económico posible el material, de manera que cumpla con la manejabilidad requerida, la velocidad de endurecimiento apropiada, la resistencia, durabilidad, masa unitaria, estabilidad de volumen y apariencia adecuada [1].

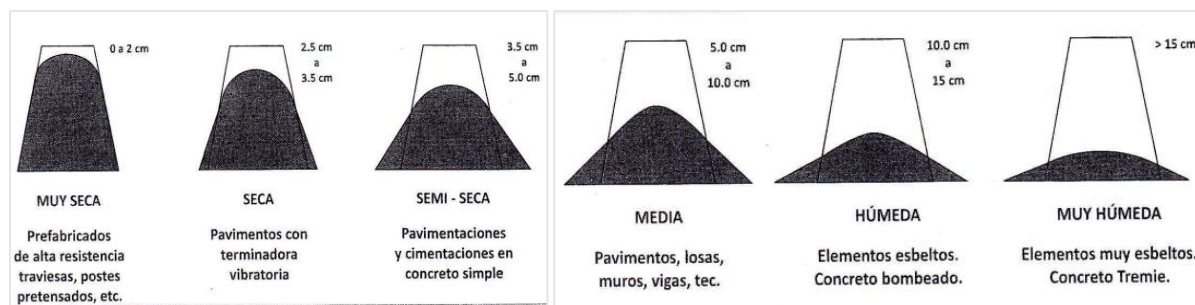
La calidad de los agregados pétreos depende de características y cualidades como su granulometría, densidad, forma y superficie. En el ámbito de la construcción se clasifican principalmente acorde a su tamaño granulométrico, dividiéndose en agregados finos, siendo aquellos fijados con tamaños de partículas de 4,76 mm a 0,075 mm; y agregados gruesos, aquellos cuyos tamaños de partículas sean superiores a los 4,76 mm. Cabe añadir, que la sección de agregados gruesos es fragmentada en gravillas, para aquellos materiales de 4,76 mm a 19 mm; y gravas, para los materiales de 19 mm a 51 mm. [1], [2]

Cabe mencionar que las propiedades del concreto están gobernadas según su razón de empleo. En estado fresco, las propiedades requeridas están condicionadas por el tipo de construcción, condiciones climáticas, y las técnicas de colocación y transporte; de manera que se permita llenar adecuadamente las formaletas, mejorar la eficiencia constructiva y evitar la presencia de burbujas o agua atrapada en el proceso de fraguado. Por otro lado, las propiedades del concreto en estado endurecido se encuentran limitadas por el diseñador de la estructura en la que se empleara. Estas propiedades suelen tener como medida la trabajabilidad de la mezcla en estado fresco, y la resistencia a la compresión en estado endurecido. [1]

Debido a que no existe un ensayo que mida de manera directa la trabajabilidad de las mezclas de concreto en estado fresco, se suele realizar el ensayo de asentamiento, el cual busca medir la consistencia del concreto con respecto a su fluidez, y a su vez, es un indicio representativo de otras propiedades como la posesividad, facilidad de colocación y terminación. Al realizar el ensayo, se clasifica la consistencia de la mezcla en muy seca, seca,

semiseca, media, húmeda, muy húmeda, de acuerdo con su asentamiento, como se evidencia en la figura 1.

Figura 1. Clasificación del concreto según su consistencia

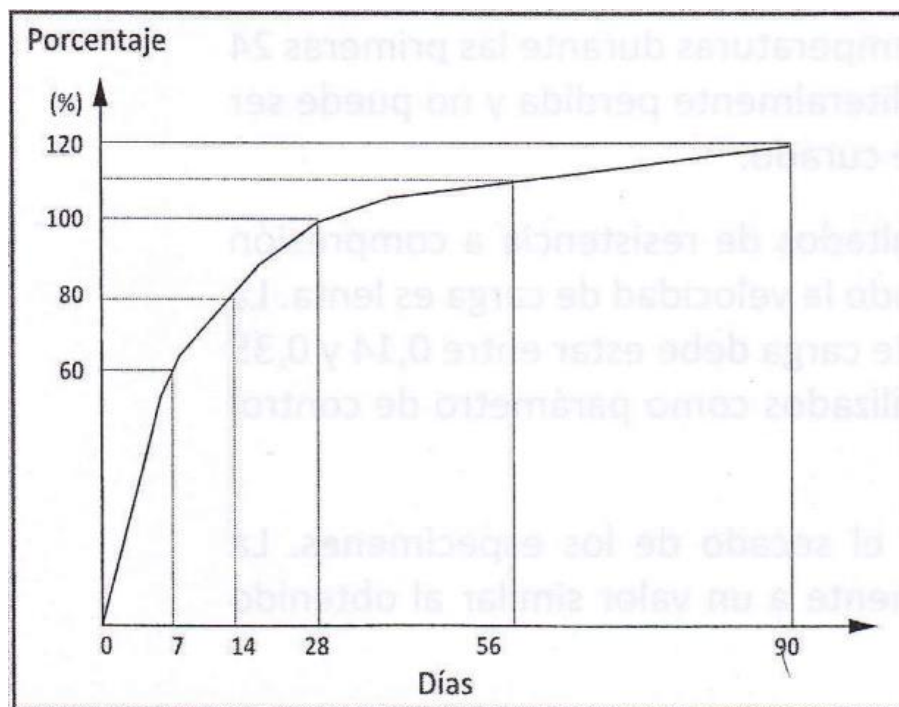


Nota: Tomado de Asocreto (2010). [1]

Por otro lado, en estado endurecido, la resistencia a la compresión es la característica mecánica más importante del concreto. Es medida en términos de esfuerzo en MPa, PSI o Kg/cm². Dicha propiedad se obtiene mediante la elaboración, curado y rotura de especímenes cilíndricos de concreto, los cuales generalmente son de 30 cm de altura por 15 cm de diámetro. Para la elaboración de dichos cilindros se vierte la mezcla preparada en tres capas dentro del molde, adicionando 25 golpes con una varilla en cada capa.

Para realizar el fallo de los especímenes y así hallar la resistencia a la compresión del concreto, se debe consultar la NTC 673. Esta propiedad se mide con una prensa que aplica carga sobre la superficie superior del cilindro de 28 días de curado. También se pueden ensayar a edades más tempranas como a 3, 7, o 14 días de curado, o a edades más tardías como a 90 y 120 días. [1], [2]

En la figura 2 se evidencia la gráfica de resistencia a la compresión del concreto con respecto al tiempo de curado, tomada como referencia. Además, la resistencia del concreto también clasifica el material, en concreto de resistencia normal, cuando es menor de 42 MPa; de alta resistencia, cuando se encuentra entre 42 y 100 MPa; y de ultra alta resistencia, cuando presenta resistencias superiores a los 100 MPa.

Figura 2. Curva de resistencia a la compresión respecto al tiempo

Nota: Tomado de Asocreto (2010). [1]

La resistencia natural del concreto depende únicamente de la resistencia del cemento endurecido, de la resistencia de las partículas del agregado, y del comportamiento y adherencia entre el cemento y los agregados. Generalmente, los agregados tienen una resistencia mayor a la pasta endurecida, a excepción de los agregados ligeros o de los concretos de alta resistencia. Por otro lado, la relación agua/cemento es el factor que más incide en la resistencia de un concreto totalmente compactado, aunque para obtener una mezcla trabajable, bien dosificada y en condiciones normales de mezclado, intervienen otros elementos como el tipo y calidad del cemento, las características del agregado, el fraguado y la edad.

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante mencionar que la dosificación y producción del concreto, aunque parezca un trabajo simple, es una labor compleja, en la que se deben seguir todas las normas y métodos establecidos referentes a la calidad de los agregados y

proceso de construcción, debido a que estas variables afectan directamente y en gran medida las propiedades y características del material, tanto en estado fresco, como endurecido. [2]

En cuanto a la granulometría de los agregados, se determina mediante el ensayo de análisis por tamizado (NTC 77), donde se obtiene el análisis granulométrico del material, curvas granulométricas y módulos de finura. Esta propiedad se relaciona directamente con la facilidad de colocación del concreto y las resistencias mecánicas, por tanto los requerimientos para obtener un buen concreto exigen que la mezcla de arena y grava mantenga un equilibrio, de tal manera que proporcione la menor cantidad de vacíos posibles y una masa unitaria máxima, generando así el mínimo espacio posible entre partículas, y consecuente, una mínima solicitud de cemento, dando lugar así a mezclas con mejores condiciones técnicas y económicas. [1]

Hay que tener en cuenta que, en la granulometría del material fino empleado en la fabricación de concreto, la cantidad de agregados que pasa por los tamices 50 y 100, pues este detalle, afecta la manejabilidad de la mezcla, la textura superficial y la exudación del concreto, además, es importante tener en cuenta el módulo de finura, el cual deberá estar entre 2,3 y 3,1 para evitar segregación del agregado grueso cuando la arena es muy fina y evitar mezclas ásperas cuando la arena es muy gruesa. Por otro lado, la granulometría del agregado grueso es de gran relevancia, ya que características obtenidas de este, como lo son el tamaño máximo nominal; son empleadas como un factor de gran influencia en diseños de mezclas debido a la relación que tiene con la facilidad y posibilidad de llenar los moldes o encofrado, y su relación con la resistencia del concreto. [1], [2]

En términos de densidad, cuanto mayor es su valor, mejor es su calidad y menor su absorción, la cual se procura que oscile entre 1 y 5%. Según su densidad, los agregados se pueden clasificar en livianos (480 – 1300 Kg/m³), normales (1300 – 2000 Kg/m³) y pesados

(2000 – 5600 Kg/m³). Por otro lado, para los agregados gruesos que sean empleados para fabricación de concreto, una densidad adecuada debe situarse entre 2.3 y 2.9 g/cm³. [1], [2]

Además, otra propiedad de suma importancia que se debe tener en cuenta es la porosidad y absorción, ya que definen la cantidad de agua final requerida para una mezcla, además, cuanto más poroso es un material, menor es su resistencia mecánica, por tanto, entre menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad.[1], [2]

4.4 Marco normativo

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), en su título C denominado “concreto estructural”, expone que las Normas Técnicas Colombianas (NTC) hacen parte de él, por consiguiente, son de total obligatoriedad para el uso de dicho título en lo relacionado con diseños, normativa, etc. Las normas NTC son difundidas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC. [8]

4.4.1 NTC 174 – Especificaciones de los agregados para concreto

4.4.1.1 Definición. Dispone de los requisitos de gradación y calidad para los agregados pétreos utilizados en mezclas en concreto, exceptuando los agregados livianos y pesados. [17]

4.4.2 NTC 77 – Tamizado de los agregados finos y gruesos

4.4.2.1 Definición. Se refiere a la distribución del tamaño de las partículas en una masa de agregado. Se define mediante un análisis granulométrico, el cual consiste en pasar cierta cantidad de material pétreos por un juego de tamices. [2]

4.4.2.2 Método. Este ensayo busca establecer la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen los agregados finos y gruesos, mediante un tamizaje. [18]

4.4.3 NTC 237 – Densidad relativa y absorción del agregado fino

4.4.3.1 Definición. La densidad está directamente relacionada con la roca origen del agregado y se define como la relación entre el peso y el volumen de cierta masa. La porosidad del agregado es una propiedad importante y está relacionada con la adherencia y resistencia a la compresión de las partículas. Dicha propiedad está asociada con la capacidad de absorber agua que tienen los agregados, dicha capacidad es dependiente de la cantidad, tamaño y continuidad de los poros. [2]

4.4.3.2 Método. Este ensayo consiste en la determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de los agregados finos. La densidad relativa (gravedad específica), una cantidad adimensional, se denota como seca al horno, saturada y superficialmente seca. Dichas densidades se determinan después de secar el agregado fino y sumergirlo en agua durante un tiempo dado. [19]

4.4.4 NTC 176 – Densidad relativa y absorción del agregado grueso

4.4.4.1 Método. Este ensayo consiste en la determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso. La densidad relativa (gravedad específica), una característica adimensional, se denota como seca al horno, saturada y superficialmente seca, o como densidad relativa aparente. Dichas densidades se determinan después de secar el agregado grueso y sumergirlo en agua durante un tiempo dado. [20]

4.4.5 NTC 92 – Densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados

4.4.5.1 Definición. La masa unitaria es la relación entre la masa y el volumen de un material. La masa unitaria se clasifica en suelta y compactada, que corresponden a la medición en su estado de reposo y utilizar un proceso de compactación, respectivamente. [2], [21]

4.4.5.2 Método. Este ensayo comprende la determinación de la masa unitaria suelta y compactada de un material granular con tamaño máximo nominal no mayor a los 125 mm. [21]

4.4.6 NTC 1776 – Contenido total de humedad por secado de los agregados

4.4.6.1 Definición. La humedad es el contenido de agua que presenta un material en su estado natural.

4.4.6.2 Método. Esta norma fija el ensayo para medir el contenido de agua (superficial y en poros) en una muestra de agregado mediante un proceso de secado. [22]

4.4.7 INVE – 133 – Equivalente de arena en suelos y agregado fino

4.4.7.1 Definición. Equivalente de arena es la medición de limos, arcillas o partículas con tamaños de arcillas que presenta un agregado fino. [23]

4.4.7.2 Método. El objeto de este ensayo es señalar las proporciones de partículas finas plásticas o arcillas y polvos que están presentes en agregados finos y suelos granulares que son pasantes del tamiz No 4. [23]

4.4.8 NTC 93 – Resistencia al desgaste por abrasión de agregados gruesos

4.4.8.1 Definición. La resistencia del concreto se relaciona directamente con la resistencia del agregado utilizado, resistencia relacionada en gran parte con la estructura de los granos de cada partícula o proceso de trituración y explotación del material granular. [2]

4.4.8.2 Método. El objeto del ensayo es mediante la máquina de Los Ángeles determinar la resistencia al desgaste de agregados gruesos de tamaños menores a 37,5 mm (1 ½ “). [24]

4.4.9 NTC 1377 – *Elaboración y curado de especímenes de concreto*

4.4.9.1 Método. Este ensayo establece los procedimientos para la elaboración y curado de muestras de concreto en el laboratorio, ejerciendo un control detallado sobre los materiales y condiciones para la realización del ensayo. [25]

4.4.10 NTC 396 – *Manejabilidad del concreto*

4.4.10.1 Método. Esta norma establece el procedimiento o método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto en la obra y el laboratorio. Además, solo aplica para concreto de cemento hidráulico. [26]

4.4.11 NTC 673 – *Resistencia a la compresión del concreto*

4.4.11.1 Método. Este ensayo establece las pautas para la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (cilindros moldeados). [27]

5. Metodología

A continuación, se describen los métodos y las distintas técnicas utilizadas para el desarrollo de esta investigación, aplicando las Normas Técnicas Colombianas (NTC), prescritas por la NSR-10 para el testeo de materiales.

5.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de carácter cuantitativo, pues se analiza la resistencia a la compresión del concreto con agregados pétreos de río (CAR) y concreto con agregados pétreos de peña (CAP), mediante diferentes procesos basados en la medición, siendo así, datos numéricos, con lo cual se busca identificar aquellas variables que intervienen en la resistencia del concreto. La resistencia a la compresión es la principal variable por medir.

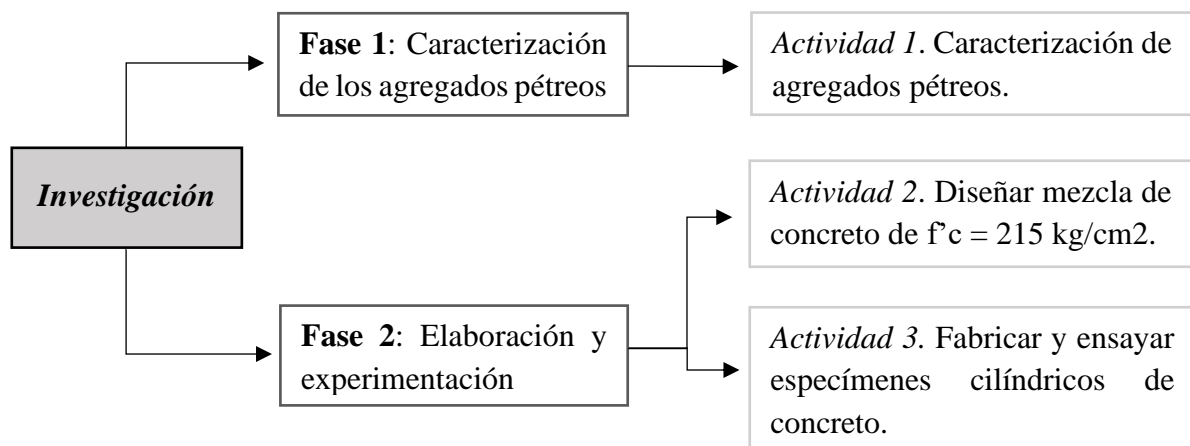
5.2 Recolección de datos

La técnica requerida para la recolección de datos del proyecto es descriptiva observacional, mediante el apoyo en herramientas de recolección de datos como formatos, tablas, entre otras, donde se organizará la información para efectuar correctamente el análisis de estos con apoyo de métodos estadísticos.

5.3 Procedimiento

Para desarrollar la presente investigación y alcanzar los objetivos planteados se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

Figura 3. Fases y actividades de la investigación



Nota: Análisis grupo investigador.

5.3.1 Fase 1: Caracterización de los agregados pétreos

5.3.1.1 Actividad 1. Caracterización de agregados pétreos. En esta actividad se realizarán ensayos de laboratorio, con el fin de conocer ciertas propiedades físico – mecánicas de los agregados pétreos de río (AR) y de peña (AP). Así mismo, los laboratorios que se realizaran se resumen en la tabla 2.

Tabla 2. *Ensayos requeridos para la caracterización de agregados*

Ensayo	NTC aplicable	AR		AP	
		Grava	Arena	Grava	Arena
Análisis granulométrico	NTC 77	•	•	•	•
Gravedad específica, densidad volumétrica y absorción de agregados gruesos.	NTC 176	•		•	
Gravedad específica, densidad volumétrica y absorción de agregados finos.	NTC 237		•		•
Masa unitaria suelta y compactada	NTC 92	•	•	•	•
Humedad	NTC 1776	•	•	•	•
Equivalente de arena	INV E – 133*		•		•
Desgaste	INV E – 218*	•		•	

Nota: Análisis grupo investigador.

(*) Normativa aplicada por laboratorio privado contratado.

Finalizando esta fase, los resultados obtenidos de cada ensayo se resumirán mediante tablas, las cuales estarán anexadas en la parte final de la fase 1, con el fin de utilizarlas en la actividad posterior, la cual es el diseño de mezcla estándar.

5.3.2 Fase 2: *Elaboración y experimentación*

5.3.2.1 Actividad 2. Diseñar mezcla de concreto de $f'c = 215 \text{ Kg/cm}^2$. En este apartado, mediante la revisión de la metodología ACI y las propiedades de los agregados pétreos de río se realizará un diseño de mezcla de concreto estándar, con el cual, se dosificarán los materiales requeridos para la fabricación de las diferentes mezclas de concreto.

5.3.2.2 Actividad 3. Fabricar y ensayar especímenes cilíndricos de concreto. En esta actividad se elaborarán dos mezclas de concreto [concreto con agregado de río (CAR) y concreto con agregado de peña (CAP)] con la ayuda de una mezcladora eléctrica, se realizará el vaciado del concreto en 36 moldes cilíndricos (16 + 2 c/u) y su respectivo proceso de fraguado, siguiendo la NTC 1377. Cabe resaltar que antes de realizar el vaciado en los moldes, se realizara el ensayo de asentamiento, en base a la NTC 396. Posteriormente, se realizarán los ensayos de compresión a los 3, 7, 14 y 28 días de fraguado, según lo establecido en la NTC 673.

Al finalizar la etapa 2 con sus respectivas actividades, se tabularán los resultados de resistencia a la compresión obtenidos mediante tablas, formatos, graficas, entre otros. A partir de los resultados encontrados, se estudiarán los resultados obtenidos para el concreto CAR y CAP, y la influencia del diseño de mezcla estándar y las propiedades de los agregados pétreos AR y AP en la resistencia a la compresión de las tipologías de concreto.

6. Desarrollo y resultados

A continuación, se describe el procedimiento para ejecutar la investigación planteada por el grupo investigador. Así mismo, cabe resaltar que los ensayos se realizaron en base a las Normas Técnicas Colombianas (NTC) prescritas anteriormente. Además, los ensayos realizados se llevaron a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás – Seccional Bucaramanga, a excepción de los ensayos de equivalente de arena (arenas) y resistencia al desgaste (gravas) que fueron realizados en el Laboratorio Construsuelos de Colombia S.A.S, ubicado en Floridablanca – Santander.

6.1 Fuentes de los agregados pétreos

6.1.1 Cantera de río (Arenera Chicamocha S.A.S)

La Arenera Chicamocha S.A.S. se encuentra localizada en la Finca el Tamarindo – Corregimiento Pescadero, del municipio de Piedecuesta – Santander. Se dedica a la extracción y trituración de agregados pétreos del río Chicamocha (Gravas, gravillas, arenas, bases, sub – bases, etc.), además, cuenta con un extenso banco de explotación aguas arriba del lugar donde se sitúa la planta de trituración y clasificación de materiales pétreos.

Figura 4. *Arenera Chicamocha S.A.S, Piedecuesta – Santander*



Nota: Tomado de Google Earth Pro.

6.1.2 Canteras de peña (Cantera La Roca y Arenera Dubai)

La Cantera La Roca se encuentra localizada en el kilómetro 6 vía Monquirá – Tunja, en el municipio de Monquirá – Boyacá. Dicha cantera se dedica a la extracción y trituración de agregados pétreos de peña, como lo son las gravas y gravillas. Por su parte, la Arenera Dubai está ubicada en el municipio de Combita – Boyacá y se dedica a la extracción de arena de peña o arena amarilla en la zona periférica del casco urbano del municipio. Así mismo, en el municipio de Barbosa – Santander, gran número de las distribuidoras de agregados pétreos comercializan los materiales extraídos en las canteras anteriormente mencionadas.

Figura 5. *Ubicación, Cantera La Roca & Arenera Dubai*



Nota: Tomado de Google Earth Pro.

6.2 Fase 1: Caracterización de los agregados pétreos

6.2.1 Actividad 1. Caracterización de agregados pétreos

6.2.1.1 Análisis granulométrico. Para la grava AR, inicialmente se tomó una muestra de gravas AR superior a 5 Kg, para posteriormente lavarla. Seguido, se procedió a secar la muestra empleando un horno eléctrico H-30128 (figura 6) a una temperatura de 110 °C durante 24 horas. Transcurrido el tiempo requerido, se tomó la masa de la muestra utilizando una balanza electrónica de precisión, obteniendo así 6.636,17 gr de muestra seca. Posteriormente, se empleó el método de tamizado para obtener el peso retenido en cada uno de los tamices propuestos por la norma NTC 77 para este tipo de material, como se muestra en tabla 3.

Así mismo, para la grava AP, se realizó el mismo procedimiento de muestreo empleado para la grava AR, obteniendo después de lavada y secada la muestra una masa de 5662,46 gr, como se evidencia en la figura 7. Posteriormente, se siguió con el proceso de tamizaje anteriormente expresado para la grava AR, obteniendo la masa retenida en cada tamiz, como se expresa en la tabla 4.

Figura 6. Tamizado, grava AR



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Tabla 3. Peso retenido en cada tamiz, grava AR

Tamiz	Ref.	1"	¾"	½"	3/8"	N. 4	N. 8	N. 16	N. 50	Fondo
<i>P retenido</i>	<i>gr</i>	0,00	873,28	3058,96	889,13	1239,25	392,52	77,08	54,87	45,43

Nota: Análisis grupo investigador

Figura 7. Tamizado, grava AP



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Tabla 4. Pesos retenidos en cada tamiz, grava AP

Tamiz	Ref	1"	¾"	½"	3/8"	N. 4	N. 8	N. 16	N. 50	Fondo
<i>P. retenido</i>	<i>gr</i>	0,00	0,00	1815,50	1413,16	1958,21	274,30	82,69	76,52	40,63

Nota: Análisis grupo investigador.

En el caso de la arena AR, se tomó una muestra de 2500 gr, se realizó un proceso de lavado con ayuda de un tamiz 200 para eliminar finos de la muestra, como se puede observar en la figura 8. Seguido, se procedió a secar la muestra empleando un horno eléctrico H-30128 a una temperatura de 110 °C durante 24 horas.

Transcurrido el tiempo, se dato la masa de la muestra seca, obteniendo 2.251,3 gr. Posteriormente, se empleó el método de tamizado para obtener el material retenido en cada uno de los tamices propuestos por la norma NTC 77 para agregados finos. Finalmente, se pesó el material retenido en cada tamiz, los cuales se muestran en la tabla 5.

Figura 8. Tamizado, arena AR

Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Tabla 5. Pesos retenidos en cada tamiz, arena AR

Tamiz	Ref.	3/8"	N. 4	N. 8	N. 16	N. 30	N. 50	N. 100	N. 200	Fondo
<i>P. retenido</i>	<i>gr</i>	0,00	6,33	183,85	452,82	583,55	568,17	336,6	117,27	1,95

Nota: Análisis grupo investigador.

De igual manera, para la arena AP se realizó el mismo procedimiento de muestreo empleado para la arena AR, obteniendo después de lavada y secada la muestra una masa de 2301,42 gr, como se evidencia en la figura 9. Posteriormente, se siguió con el proceso de tamizaje expresado para la arena AR, obteniendo los pesos retenidos en cada tamiz, como se expresa en la tabla 6.

Figura 9. Tamizado, arena AP



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Tabla 6. Pesos retenidos en cada tamiz, arena AP

Tamiz	Ref.	3/8"	N. 4	N. 8	N. 16	N. 30	N. 50	N. 100	N.200	Fondo
<i>P.retenido</i>	<i>gr</i>	0,00	31,36	33,55	25,82	84,05	1232,28	791,54	91,10	6,82

Nota: Análisis grupo investigador.

6.2.1.2 Densidad volumétrica y absorción. Siguiendo la NTC 176, se tomó una muestra de grava AR superior a 3 Kg, la cual fue secada en horno eléctrico H-30128 durante 24 horas. Posteriormente, fue sumergida en agua por 24 horas con el fin de saturar los vacíos de la muestra. Realizado este proceso, con un paño se removió el agua de la superficie de la muestra y se tomó la masa en su condición superficialmente seca (3461,49 gr).

Siguiendo con el procedimiento, con la ayuda del equipo para ensayos de gravedad específica se obtuvo la masa aparente (2094 gr), como se puede observar en la figura 10. Por último, la muestra fue secada empleando un horno eléctrico H-30128 a una temperatura de 110 °C durante 24 horas, y así, tomar la masa seca (3437,57 gr).

Figura 10. *Muestra saturada, seca y masa aparente, grava AR*



Nota: Registro fotográfico grupo investigador.

Figura 11. *Muestra saturada, seca y masa aparente, grava AP*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Del mismo modo, para la grava AP se ejecutó el mismo procedimiento de muestreo establecido en la norma correspondiente. Por otro lado, al ejecutar el procedimiento y datar la medición de las masas superficialmente seca, aparente y seca; se obtuvieron valores de 3233,46 gr, 1988 gr y 3219,03 gr, respectivamente. El procedimiento llevado a cabo se puede evidenciar en la figura 11.

Siguiendo la NTC 237, se tomó una muestra de arena AR de 1500 gr, la cual fue secada en horno eléctrico H-30128 durante 24 horas. Posteriormente, fue sumergida en agua por 24 horas con el fin de saturar los vacíos de la muestra. Realizado este proceso, con un secador mecánico se fue secando la muestra hasta obtener la humedad ideal, este factor se verificó mediante el ensayo del cono.

Figura 12. *Secado superficial, ensayo del cono y agitación, arena AR*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Después, se pesaron 500 gr de muestra superficialmente seca para realizar el ensayo del picnómetro (500 ml) por el método gravimétrico, como se expone en la figura 12. Por último, la muestra resultante del método gravimétrico fue secada empleando un horno eléctrico H-30128 a una temperatura de 110 °C durante 24 horas, donde se obtuvo la masa seca (496,26 gr).

Así mismo, para la arena AP se realizó el mismo procedimiento de muestreo establecido en la norma correspondiente, como se evidencia en la figura 13. Por otro lado, al ejecutar el procedimiento del picnómetro (500 ml), se dato una masa de muestra saturada y superficialmente seca de 500 gr; y una masa en estado seco de 494,61 gr.

Figura 13. *Secado superficial, ensayo del cono y del picnómetro, grava AP*



Nota: Análisis grupo investigador.

6.2.1.3 Masa unitaria suelta y compactada. En base a la NTC 92, inicialmente se tomó una muestra de grava AR aproximada de un 150% del volumen del molde a utilizar en el ensayo (9,3 litros), para ser secada en un horno eléctrico H-30128 a una temperatura de 110 °C durante 24 horas. Transcurrido el tiempo de secado, para la masa unitaria suelta se empleó el método de paleo, donde se llenó el recipiente sin aplicarle apisonamiento, para luego nivelar la superficie del molde con una varilla de enrasar, y finalmente, se tomó la masa de la muestra más el molde (19,27 Kg).

De igual manera, para la grava AP, se llevó a cabo el mismo procedimiento de muestreo, sin embargo, se utilizó un molde de 9,3 litros, ya que el tamaño máximo nominal es $\frac{3}{4}$ ". En cuanto al desarrollo del ensayo, se emplearon los mismos métodos mencionados (paleo y apisonamiento) para la grava AR, obteniendo valores de muestra más molde en estado suelto

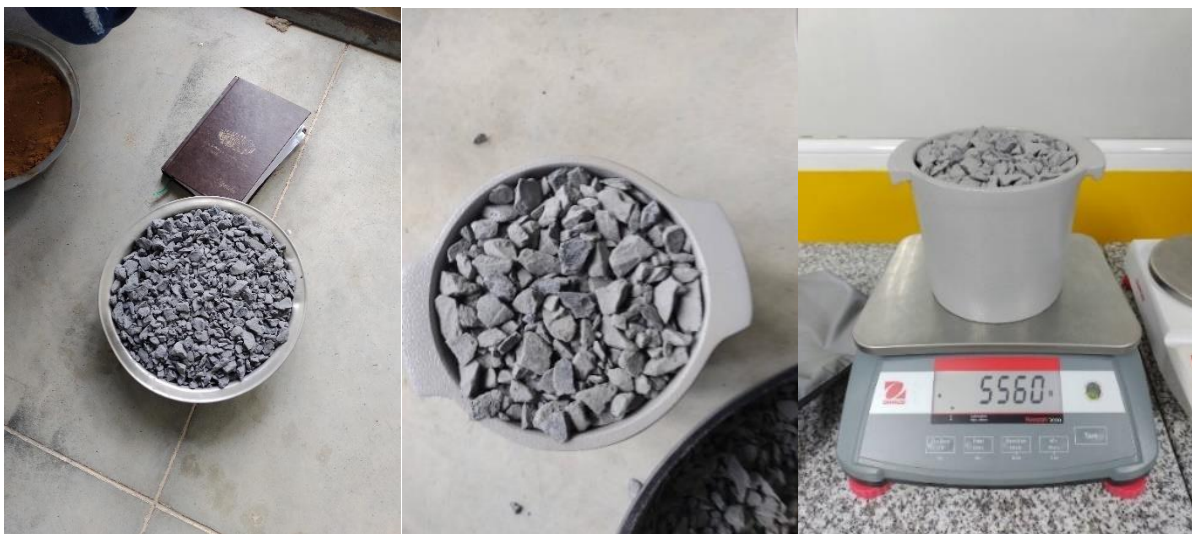
y compactado de 5,56 Kg y 6,11 Kg respectivamente. El procedimiento llevado a cabo se evidencia en la figura 15.

Figura 14. Toma de muestra y masa, grava AR



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Figura 15. Llenado del molde y masa, grava AP



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

En base a la NTC 92, inicialmente se tomó una muestra de arena AR aproximada de un 150% del volumen del molde a utilizar en el ensayo (2,8 L), para ser secada en un horno eléctrico H-30128 a una temperatura de 110 °C durante 24 horas. A partir de este punto, se

sigue el mismo procedimiento utilizado para la obtención de la masa unitaria suelta y compactada de la grava AR, como se evidencia en la figura 16.

Figura 16. Llenado, compactación y enrazado de la muestra, arena AR



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Así mismo, para la arena AP, se llevó a cabo el mismo procedimiento de muestreo; y en la ejecución del ensayo como tal, se emplearon los mismos métodos mencionados (paleo y apasionamiento), como se observa en la figura 17, obteniendo valores de muestra más molde en estado suelto y compactado; de 5.49 Kg y 5.90 Kg respectivamente.

Figura 17. Toma de masa y compactación de la muestra, arena AP



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

6.2.1.4 Humedad. Siguiendo la norma NTC 1776, para determinar la humedad de la grava AR se tomó una muestra debidamente pesada de 3 Kg, para luego ser secada en un horno eléctrico H-30128 a una temperatura de 110 °C durante 24 horas, y así tomar la masa de la muestra en estado seco (2988,19 gr). De igual manera, para la arena AR, se llevó a cabo el mismo procedimiento, variando únicamente la masa de la muestra, siendo esta de 500 gr en estado húmedo y resultando así 479,07 gr en estado seco. Dicho procedimiento se evidencia en la figura 18.

Figura 18. Toma de masa y secado, grava y arena AR



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Para el material AP, se realizó el mismo procedimiento anteriormente mencionado, con las diferencias que; para la grava, se tomó una muestra cuya masa data 2039,38 gr, la cual después de seca registro una masa de 2025,47 gr; y para el agregado fino, se tomó una muestra húmeda de masa 500,77 gr, la cual después de seca dato una masa de 484,49 gr. Dicho procedimiento se muestra en la figura 19.

Figura 19. Toma de masa y secado, grava y arena AP



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

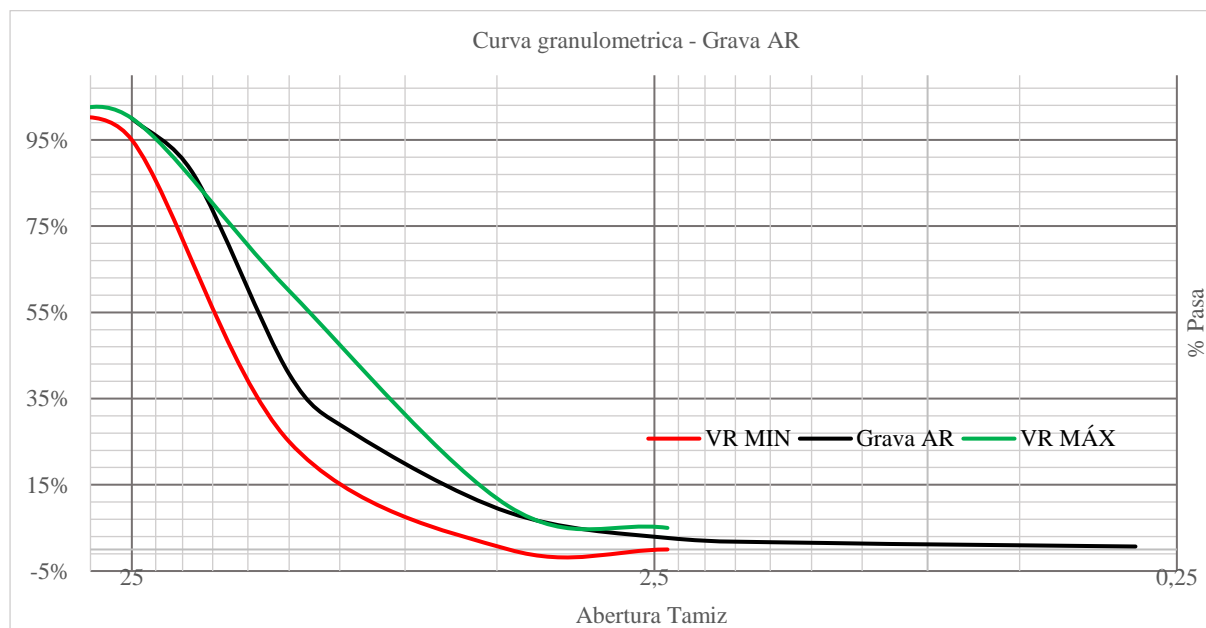
6.2.1.5 Equivalente de arena y resistencia al desgaste. Como se mencionó al inicio del presente capítulo, para realizar los ensayos de equivalente de arena y resistencia al desgaste, se optó por recurrir a los servicios de un laboratorio privado (Construsuelos de Colombia S.A.S), ya que, en las instalaciones del laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Santo Tomás Seccional Bucaramanga no se cuenta con los equipos para realizar los ensayos en cuestión. Adicionalmente, Construsuelos de Colombia S.A.S es un laboratorio ubicado en Floridablanca – Santander y cumple con los lineamientos de certificaciones como ISO 9001:2015, ISO 14001:2015, ISO 45001:2018, entre otras.

Por otro lado, el laboratorio privado contratado realiza los ensayos en base a la normativa INVIAS. Así mismo, lleva a cabo la metodología plasmada en la INV E – 133 – 13 para ensayos de equivalente de arena y la INV E – 218 – 13 para la resistencia al desgaste de agregados gruesos inferiores a 37,5 mm. Además, los resultados de dichos laboratorios se presentan en el Apéndice A y las tablas 7 y 8.

6.2.1.6 Resultados de la actividad 1. Al finalizar los ensayos planteados para la caracterización de los agregados pétreos, se grafican las curvas granulométricas y se tabulan las propiedades obtenidas.

Curvas granulométricas. La mejor forma de plasmar gráficamente la distribución de los tamaños de partículas en un material es mediante la elaboración de una curva granulométrica. En la figura 20 se puede observar la curva granulométrica de la grava AR. Según la NTC 174, la grava AR clasifica con un número de tamaño del agregado de 57 (25 mm a 4,75 mm) ya que los límites expresados por esta clasificación se ajusta a los datos obtenidos para esta tipología de grava.

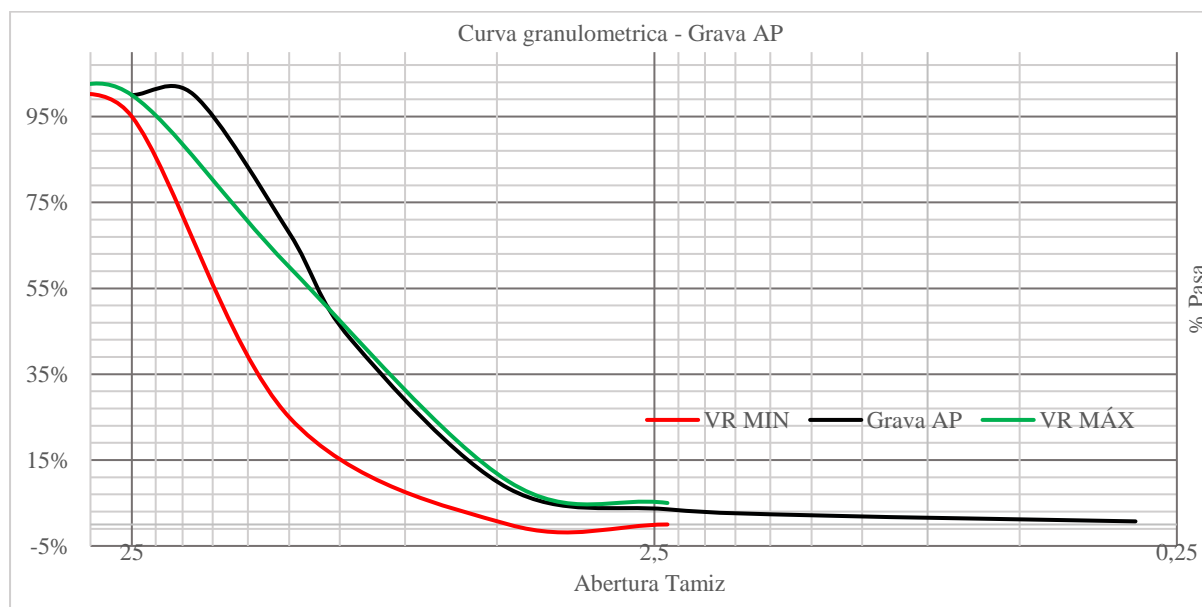
Figura 20. Curva granulométrica, grava AR



Nota: Análisis grupo investigador.

Por otro lado, la granulometría de la grava AP expresada en la figura 21 no se encuentra dentro de los límites condicionados por la grava AR. Sin embargo, el número del tamaño del agregado que mejor se ajusta es el 57 (19 mm a 4,75 mm), según la NTC 174.

Figura 21. Curva granulométrica, grava AP



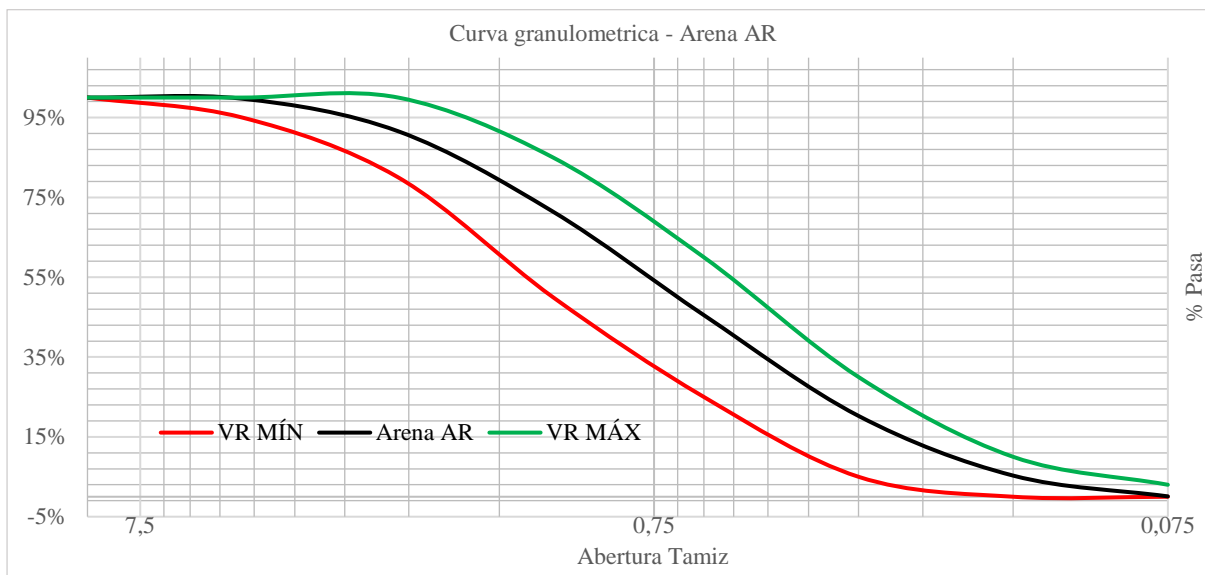
Nota: Análisis grupo investigador.

La NTC 174 establece los límites para la granulometría de las gravas según el número del tamaño del agregado. Por su parte, La granulometría de la grava AR (Arenera Chicamocha S.A.S) se ajusta en gran medida a los límites establecidos por un número de tamaño del agregado de 57 (25 mm a 4,75 mm). Partiendo de los rangos establecidos por la grava AR, la granulometría de la grava AP se encuentra fuera de estos como se observa en la figura 21, este comportamiento se le atribuye a la falta de material retenido en el tamiz $\frac{3}{4}$ ".

A diferencia de los agregados gruesos, la NTC 174 establece un solo rango para la granulometría de agregados finos empleados en la fabricación de concreto. A partir de esto, la curva granulométrica de la arena AR está dentro de los rangos establecidos por la norma, como se puede observar en la figura 22.

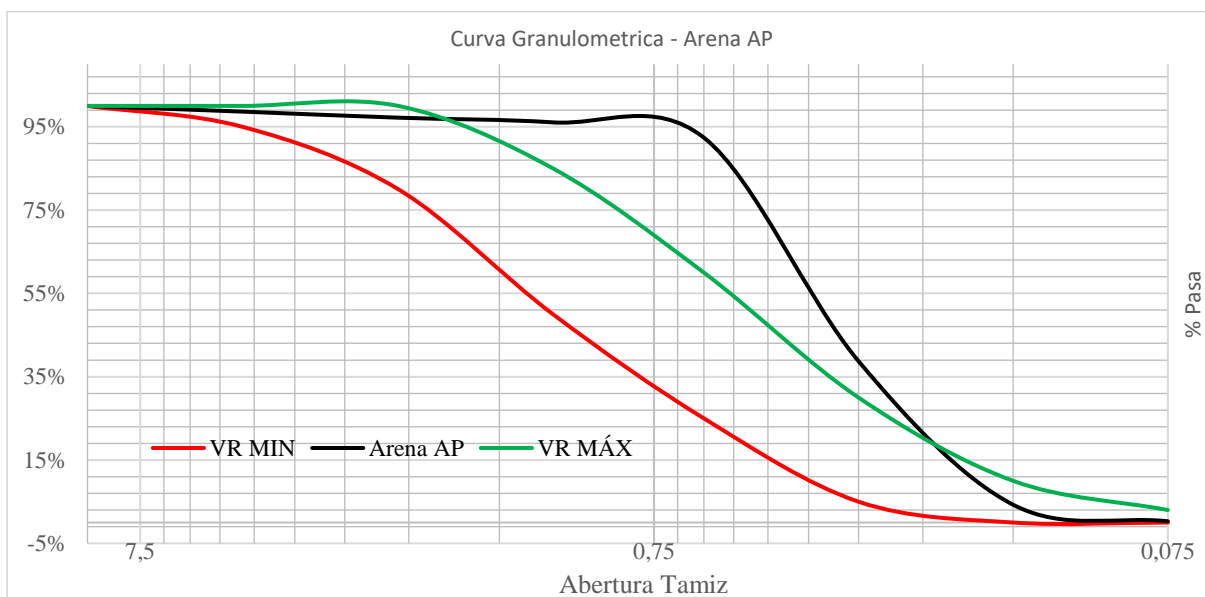
Como se muestra en la figura 23, la granulometría de la arena AP no se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa, este comportamiento se da por la acumulación de más del 80% de la muestra tamizada entre los tamices No 50 y No 100.

Figura 22. Curva granulométrica, arena AR



Nota: Análisis grupo investigador.

Figura 23. Curva granulométrica, arena AP



Nota: Análisis grupo investigador.

La granulometría de la arena AR cumple con los rangos fijados por la norma NTC 174, como se observa en la figura 22. Por su parte, la granulometría de la arena AP no se encuentra dentro de los límites establecidos en la normativa, dicho desfase se presenta por la retención del 85% de la muestra entre los tamices No. 50 y No. 100, dicho comportamiento se puede observar en la figura 23.

6.2.1.6.1 Propiedades de los agregados pétreos. En el caso de las gravas se identifica el TMN, densidad SH, densidad SSS, densidad aparente, masa unitaria suelta, masa unitaria compactada, humedad, absorción, vacíos, módulo de finura y resistencia al desgaste o abrasión de los agregados pétreos de diferentes procedencias, como se expresa en la tabla 7.

Tabla 7. *Propiedades físicas y mecánicas, grava AR y AP*

Propiedades	Unidades	Grava AR	Grava AP
<i>TMN</i>	-	¾"	¾"
<i>Densidad seca SH</i>	<i>Kg/m3</i>	2510	2580
<i>Densidad SSS</i>	<i>Kg/m3</i>	2530	2590
<i>Densidad aparente</i>	<i>Kg/m3</i>	2550	2610
<i>Masa unitaria suelta</i>	<i>Kg/m3</i>	1530	1410
<i>Masa unitaria compactada</i>	<i>Kg/m3</i>	1640	1610
<i>Humedad</i>	%	0,40	0,69
<i>Absorción</i>	%	0,70	0,45
<i>Vacíos</i>	%	35,05	37,71
<i>Módulo de finura</i>	-	5,32	4,74
<i>Desgaste</i>	%	30,80	17,16

Nota: Análisis grupo investigador.

De los resultados mostrados en la tabla 7, se puede observar que tanto las densidades como las masas unitarias de las dos tipologías de grava no varían más del 10%. Con respecto

a las características, se evidencia mayor variabilidad, por ejemplo, la grava AP es 0,29% más húmeda que la grava AR, la grava AR absorbe un 0,25% más agua y un módulo de finura mayor con respecto a la grava AP, este último se debe a la presencia de material de ¾” en la grava AR.

Por su parte, el porcentaje de desgaste de la grava AR denota un valor de 30,80% y 17,16% para la grava AP. Con respecto a lo anterior, las dos tipologías de agregado grueso cumplen con el valor máximo de desgaste (40%) establecido en la norma INV E 218 – 13. Sin embargo, la grava AR presenta mayor desgaste que la grava AP, aproximadamente un 13,7% .

En el caso de las arenas se identifica la densidad SH, densidad SSS, densidad aparente, masa unitaria suelta, masa unitaria compactada, humedad, absorción, vacíos, módulo de finura y equivalente de arena de los agregados pétreos de diferentes procedencias, como se muestra en la tabla 8.

Tabla 8. *Propiedades físicas, arena AR y AP*

Propiedades	Unidades	Arena AR	Arena AP
<i>Densidad seca SH</i>	<i>Kg/m³</i>	2610	2410
<i>Densidad SSS</i>	<i>Kg/m³</i>	2630	2440
<i>Densidad aparente</i>	<i>Kg/m³</i>	2660	2480
<i>Masa unitaria suelta</i>	<i>Kg/m³</i>	1560	1390
<i>Masa unitaria compactada</i>	<i>Kg/m³</i>	1720	1530
<i>Humedad</i>	<i>%</i>	4,38	3,36
<i>Absorción</i>	<i>%</i>	0,75	1,10
<i>Vacíos</i>	<i>%</i>	34,47	39,40
<i>Módulo de finura</i>	<i>-</i>	3,66	2,72
<i>Equivalente de arena</i>	<i>%</i>	85	30

Nota: Análisis grupo investigador.

Con respecto a los datos expresados en la tabla 8, se destaca el módulo de finura de la arena AR (3,6), el cual se encuentra fuera del rango establecido por la NTC 174 ($2,3 < \text{módulo de finura} < 3,1$). Por su parte, la arena AP (3,66) cumple con los parámetros de la normativa aplicada. Con respecto a otras características, la arena AR es 1,02% más húmeda que la arena AP, la arena AP absorbe un 0,35% más de agua que la arena AR. Finalmente, se denota el equivalente de arena de 85% para la arena AR y 30% para la arena AP; esta última no cumple con lo establecido por la normativa INVIAS, ya que es inferior al límite permisible (60%).

6.3 Fase 2. Elaboración y experimentación

6.3.1 Actividad 2. Diseñar mezcla de concreto $f'c = 215 \text{ Kg/cm}^2$.

Después de ejecutar los laboratorios propuestos para los agregados pétreos, se procedió a realizar el diseño de la mezcla de concreto con $f'c = 215 \text{ Kg/cm}^2$, de acuerdo con el método recomendado en el comité ACI 211, empleando como material modelo los agregados AR. El presente método cuenta de una serie de pasos especificados a continuación:

6.3.1.1 Paso 1. Selección del asentamiento. De acuerdo con la tabla 9 y las especificaciones adecuadas para la mezcla de concreto, cuyo fin fue para elaborar las probetas cilíndricas, se trabajó con una consistencia media.

Tabla 9. *Consistencia de diseño*

Consistencia	Asentamiento cm	Tipo de estructura y condiciones de colocación
Media	5 – 10	Pavimentos compactados a mano. Losas medianamente reforzadas con mediana compactación, columnas, vigas, fundaciones y muros reforzados con vibración.

Nota: Tomado de Gutiérrez (2003). [2]

6.3.1.2 Paso 2. Selección del tamaño máximo del agregado. De acuerdo con la granulometría realizada a los agregados empleados para el diseño, se encontraron tamaños máximos de partículas de 3/4" para los agregados AR tomados como referencia.

6.3.1.3 Paso 3. Estimación del contenido de agua en litros. Teniendo en cuenta el tamaño máximo nominal del agregado (20 mm) y el asentamiento empleado (5 a 10 cm), se tomó el valor de 200 litros de agua por metro cubico de concreto, como se expresa en la tabla 10.

Tabla 10. Cantidad de agua según asentamiento de diseño

Volumen unitario de agua							
Asentamiento (cm)	Agua, en l/m ³ , para los tamaños máx nominales de agregado grueso y consistencia indicados						
	10mm	13mm	20mm	25mm	40mm	50mm	75mm
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145
8 a 10	225	215	200	195	175	170	180
15 a 18	240	230	210	205	185	180	170

Nota: Tomado de Gutiérrez (2003). [2]

6.3.1.4 Paso 4. Determinación de la resistencia a diseño. Teniendo en cuenta la cantidad de factores que se ven involucrados en la fabricación de concreto, se debe proponer una resistencia $f'c$ mayor a la requerida. Por tanto, sabiendo que la resistencia solicitada es de 215 Kg/cm², se tuvo en cuenta la formula expresada en la tabla 11, para obtener la resistencia de diseño $f'cr = 300$ Kg/cm².

Tabla 11. Resistencia de diseño

Condición	Formula
$f'c < 210 \text{ Kg/cm}^2$	$f'cr = f'c + 70 \text{ Kg/cm}^2$
$210 \text{ Kg/cm}^2 < f'c < 350 \text{ Kg/cm}^2$	$f'cr = f'c + 85 \text{ Kg/cm}^2$
$f'c > 350 \text{ Kg/cm}^2$	$f'cr = f'c + 100 \text{ Kg/cm}^2$

Nota: Tomado de Gutiérrez (2003). [2]

6.3.1.5 Paso 5. Selección de la relación agua/cemento. La selección de la relación agua – cemento se tomó de acuerdo con la tabla 12, donde se seleccionó en base a la resistencia $f'cr = 300 \text{ Kg/cm}^2$, tomando así, una relación agua cemento de 0,55.

Tabla 12. Relación agua – cemento de diseño en peso

$f'cr$ 28 días <i>Kg/cm²</i>	Relación agua - cemento de diseño en peso	
	<i>Concretos sin aire incorporado</i>	<i>Concretos con aire incorporado</i>
150	0,8	0,71
200	0,7	0,61
250	0,62	0,53
300	0,55	0,46
350	0,48	0,4
400	0,43	...
450	0,38	...

Nota: Tomado de Gutiérrez (2003). [2]

6.3.1.6 Paso 6. Cálculo del contenido de cemento. En este apartado, se calculó la cantidad de cemento en kilogramos, por unidad de volumen de concreto.

Para obtener este valor, se calculó mediante $C = A / (A/C)$. Donde C es la cantidad de cemento, A es el contenido de agua previamente calculada (200 l/m³); y A/C es la relación agua cemento tomada (0,55). Por tanto, al calcular la cantidad de cemento en kilogramos (Kg)

por unidad de volumen, resultó un valor de 363,64 Kg de cemento empleados por metro cubico de concreto a fabricar.

6.3.1.7 Paso 7. Estimación del contenido de agregado grueso. Para calcular el volumen proporcional del agregado grueso, se tuvo en cuenta la tabla 13, donde la cantidad del agregado grueso depende de dos variables, siendo estas el tamaño máximo nominal del mismo material y el módulo de finura de la arena a utilizar, estos valores se obtuvieron en los ensayos de granulometría.

Tabla 13. *Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto*

TMN del agregado grueso	Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen del concreto, para diversos módulos de finura del fino						
	(")	2,4	2,6	2,8	3	3,1	4
3/8	0,5	0,48	0,46	0,44	0,39	-	
1/2	0,59	0,57	0,55	0,53	0,48	0,3	
3/4	0,66	0,64	0,62	0,6	0,58	0,44	
1	0,71	0,69	0,67	0,65	0,63	0,51	
1 1/2	0,76	0,74	0,72	0,7	0,68	0,59	
2	0,78	0,76	0,74	0,72	0,71	0,64	
3	0,81	0,79	0,77	0,75	0,76	0,69	
6	0,87	0,85	0,83	0,81	0,82	0,76	

Nota: Tomado de Gutiérrez (2003). [2]

Teniendo en cuenta que el módulo de finura resultante del agregado fino es de 3,66, se realizó una interpolación lineal entre los valores más cercanos, propuestos para agregados de 3/4". Los valores por utilizar son 0,58, para módulos de finura de 3,1; y 0,44, para módulos de finura de 4. Obteniendo así, un valor del contenido de agregado grueso de 0,49 por unidad de volumen.

A este valor obtenido, se multiplico por la relación existente entre el peso unitario compactado y el peso específico saturado y superficialmente seco de la grava. Siendo este valor de 0.65, el volumen absoluto del agregado grueso a emplear es de 0,32.

6.3.1.8 Paso 8. Estimación del contenido del agregado fino. El volumen de agregado fino a utilizar se calcula mediante la diferencia entre el volumen total de la mezcla, con la suma de los volúmenes de agua, cemento y agregado grueso. Teniendo en cuenta que los volúmenes unitarios de agua, cemento y agregado grueso son 0.20 m³, 0.12 m³ y 0.32 m³ respectivamente; el contenido de agregado fino a utilizar fue de 0.36 m³.

6.3.1.9 Paso 9. Proporciones iniciales. Para realizar las proporciones volumétricas obtenidas, en la tabla 14 se expresan tanto los volúmenes de cada material como su relación con respecto al volumen del cemento. Así mismo, en la tabla 15 se expresa la dosificación parcial (Kg) de cada material para un metro cubico de concreto.

Tabla 14. *Dosificación estándar*

Material	-	<i>Cemento</i>	<i>Arena AR</i>	<i>Grava AR</i>	<i>Agua</i>
Volumen	<i>m³</i>	0,12	0,36	0,32	0,20
Dosificación	<i>Material/cemento</i>	1	3,2	2,8	1,7

Nota: Análisis grupo investigador.

Tabla 15. *Masa de cada material por m³, dosificación parcial*

Material	Dosificación * m³ - CAR	
<i>Cemento</i>	<i>Kg</i>	363,64
<i>Agregado fino</i>	<i>Kg</i>	959,16
<i>Agregado grueso</i>	<i>Kg</i>	808,23
<i>Agua</i>	<i>Lt</i>	200,00

Nota: Análisis grupo investigador.

6.3.1.10 Paso 10. Ajuste por humedad de los agregados. Con el fin de evitar problemas en la relación agua – cemento, se realizó una corrección en la cantidad de agua a disponer en la mezcla, teniendo en cuenta la humedad de los materiales en estado habitual, y la absorción de estos mismos. Realizando este procedimiento, se obtuvo un aporte de agua del agregado fino de 34,78 litros, y de -2,43 del agregado grueso. Teniendo en cuenta estos valores, la cantidad de agua en litros por metro cubico de concreto, se redujo a 167,65 litros. Los valores se expresan en la tabla 16.

Tabla 16. *Masa de cada material por m³, dosificación ajustada por humedad*

Material	Dosificación corregida por humedad - CAR	
<i>Cemento</i>	<i>Kg</i>	363,64
<i>Agregado fino</i>	<i>Kg</i>	1001,16
<i>Agregado grueso</i>	<i>Kg</i>	811,43
<i>Agua</i>	<i>Lt</i>	167,65

Nota: Análisis grupo investigador.

6.3.1.11 Resultados de la actividad 2. Los resultados para el diseño de mezcla de concreto se plasman en el procedimiento llevado a cabo desarrollo de la actividad 2. El resultado final se expresa en la tabla 16 obtenida en el paso 10 denominado “ajuste por humedad de los agregados”, donde se muestra la dosificación de cada material para la fabricación de un metro cubico de concreto para una resistencia a la compresión de 215 Kg/cm².

6.3.2 Actividad 3. Fabricar y ensayar especímenes cilíndricos de concreto

A continuación, se describe el procedimiento que se llevó a cabo para la elaboración y la respectiva rotura de los especímenes cilíndricos de las mezclas de concreto CAR y CAP a diferentes edades de curado.

6.3.2.1 Dosificación de los materiales. A partir del diseño de mezcla realizado se obtuvo la dosificación estándar con las propiedades de los agregados AR. Con lo cual, se relacionaron las dosificaciones por metro cubico obtenidas en el diseño de mezcla, con el volumen expresado en la tabla 17, donde el volumen total obtenido fue de 0,1 m³ para cada una de las mezclas. La cantidad por cada material para las mezclas se expresan en la tabla 18.

Adicionalmente, el número de cilindros requeridos se relacionan así: tres para el análisis y un testigo, obteniendo cuatro en total para cada edad de curado, las cuales son 4 (3, 7, 14 y 28 días).

Tabla 17. Volumen requerido de mezclas CAR y CAP

Descripción		CAR	CAP
Diámetro	<i>mm</i>	150	150
Altura	<i>mm</i>	300	300
Volumen	<i>m³</i>	0,0053	0,0053
No. Cilindros	-	16 + 2 extras	16 + 2 extras
Volumen Total	<i>m³</i>	≈ 0,1	≈ 0,1

Nota: Análisis grupo investigador.

Tabla 18. Dosificación para el volumen requerido de mezclas CAR y CAP

Material	Dosificación por m ³	Dosificación CAR	Dosificación CAP
	<i>Kg*m³</i>	<i>Kg</i>	<i>Kg</i>
<i>Cemento</i>	371,78	37,01	37,01
<i>Agregado grueso</i>	811,43	82,59	82,59
<i>Agregado fino</i>	980,31	101,91	101,91
Material	Lt*m³	Lt	Lt
<i>Agua</i>	173,38	17,07	17,07

Nota: Análisis grupo investigador.

6.3.2.2 Preparación de los materiales. Posteriormente, como se observa en las figuras 24 y 25, se aglomeraron los materiales necesarios para la elaboración de las mezclas de concreto y se realizó un paleo para obtener una distribución homogénea de las partículas de la grava y arena.

Figura 24. Preparación de arena, grava y cemento, concreto CAR



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Figura 25. Preparación de arena, grava y cemento, concreto CAP



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

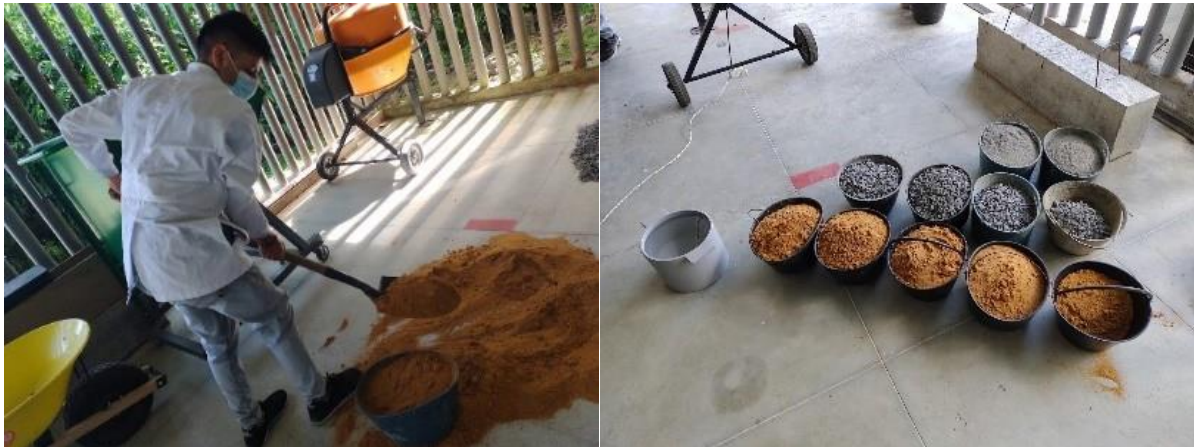
Seguido, se cuantificaron las masas totales expresadas en la tabla 18 para la grava, arena y cemento, realizando un muestreo con baldes o cuñetes disponibles, como se observa en las figuras 26 y 27. En el caso del agua, se tomó un recipiente cilíndrico de 9,3 L para tener una medida de referencia. Además, se empleó cemento hidráulico de Uso General (UG) de la marca CEMEX.

Figura 26. *Dosificación de los materiales, concreto CAR*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Figura 27. *Dosificación de los materiales, concreto CAP*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

6.3.2.3 Mezclado y vaciado. Inicialmente, se adecuó la mezcladora eléctrica y los moldes cilíndricos de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, mostrados en la figura 28, en un espacio idóneo para realizar la mezcla de concreto según la NTC 1377. Los moldes se ajustaron a sus respectivas bases y se aplicó aceite en la parte interior para que la etapa de desencofrado fuese más sencilla.

Figura 28. *Mezcladora mecánica y moldes cilíndricos*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Figura 29. *Mezclado de los materiales, concreto CAR*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Con las etapas anteriores ya realizadas, se procedió a encender la mezcladora y posicionar correctamente la cuba de esta, para adicionar cada uno de los materiales. Inicialmente, se adicionó la grava con un poco de agua, la arena, cemento y el restante de agua. Seguido, el proceso de mezclado se dejó por 3 minutos, según lo establecido por la NTC 1377, este procedimiento se observa en la figura 29. Finalmente, la mezcla en su totalidad se almaceno en una carreta para facilitar el proceso de vaciado de esta en los moldes cilíndricos.

En el caso de la mezcla de concreto CAP se adicionaron 4 Litros de agua a la dosificación inicial, ya que en el proceso de mezclado se observó poca trabajabilidad de esta mezcla, factor que dificultaría el vaciado de la mezcla en los moldes cilíndricos. En la figura 30 se observa la ejecución del procedimiento.

Figura 30. *Mezclado de los materiales, concreto CAP*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Con la mezcla ya lista, se realizó el ensayo de asentamiento siguiendo la NTC 396. Inicialmente se humedeció la parte interna del cono de Abrams para evitar fricción entre la mezcla y paredes del molde que puedan afectar un asentamiento natural de la mezcla.

El molde se llenó en tres capas, aplicando 25 golpes con una varilla de apisonado en cada una de ellas, con el fin de compactar la muestra. Finalmente, como se evidencia en las

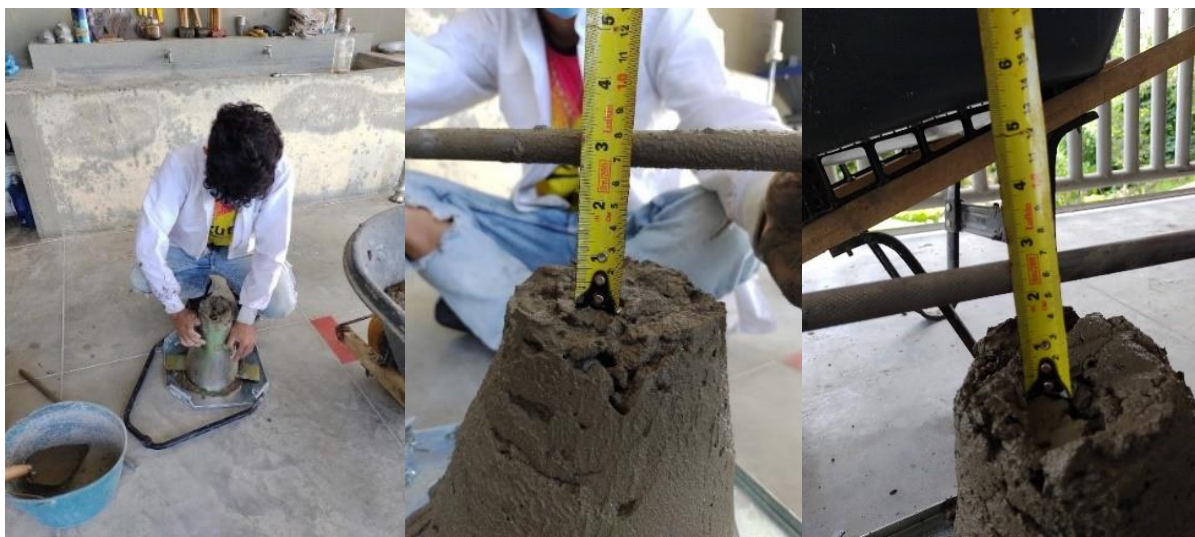
figuras 31 y 32, se retiró el molde y utilizando un flexómetro, se midió el desplazamiento vertical de la muestra.

Figura 31. *Ensayo de asentamiento, concreto CAR*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Figura 32. *Ensayo de asentamiento, concreto CAP*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Después de verificar el asentamiento de las mezclas, se inició con el vaciado de estas en los moldes cilíndricos. Inicialmente, el vaciado de las mezclas en los moldes se distribuyó en 3 capas, aplicando 25 golpes en cada una y adicionalmente, con un mazo de goma, se le aplicó de 10 a 15 golpes en la parte externa del molde; siguiendo lo establecido por la NTC 1377 para elaboración de muestras. Este proceso se llevó a cabo para los 16 cilindros + 2

adicionales de cada tipología de mezcla. En la figura 33 se observa el resultado final del proceso.

Figura 33. *Vaciado de la mezcla, concreto CAR y CAP, respectivamente*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

6.3.2.4 Desencofrado y curado. Siguiendo el procedimiento especificado por la NTC 1377, 24 horas después de la elaboración de los especímenes, se realizó el desencofrado de estos, soltando suavemente la parte atornillada del molde utilizado, con el fin de separar la muestra del molde y conservar su geometría.

Figura 34. *Desencofrado y curado de especímenes, concreto CAR*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Al finalizar el proceso de desencofrado, se codificaron los especímenes con iniciales AR para mezclas CAR, AP para mezclas CAP y respectivas numeraciones, como se observa

en las figuras 34 y 35. Posteriormente, los especímenes se depositaron en un estanque de curado, el cual fue previamente llenado de agua (23°C) libre de impurezas y con adición de cal.

Figura 35. *Desencofrado y curado de especímenes, concreto CAP*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

6.3.2.5 Ensayos de resistencia a la compresión. Con los especímenes en proceso de curado, se procedió a la etapa de rotura de estos para las edades de 3, 7, 14 y 28 días de curado. Dicha rotura se hizo con el fin de obtener la resistencia a la compresión a diferentes edades de curado, en base a la NTC 673.

Figura 36. *Caracterización geométrica y masa de especímenes, concreto CAR*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Para cada edad de curado, como se evidencia en las figuras 36 y 37, inicialmente se tomaron 4 especímenes cilíndricos del estanque y utilizando un flexómetro se tomaron 3

medidas de altura y de diámetro para cada espécimen, con el fin de conocer sus características geométricas. Posteriormente, se dató su masa con la ayuda de una balanza analítica.

Figura 37. *Caracterización geométrica y masa de especímenes, concreto CAP*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Siguiendo con el procedimiento estipulado por la NTC 673, se llevaron los especímenes a la máquina de ensayo (Automax, E-Modulus Automatic Console con su respectiva prensa para ensayos de compresión) que se muestra en la figura 38; para realizar el ensayo de resistencia a la compresión.

Figura 38. *Automax E-Modulus Automatic Console, Laboratorio USTABUCA*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Para el ensayo de resistencia a la compresión, inicialmente se prepara la máquina de ensayo y se proporcionaron datos como fecha de elaboración de la muestra, fecha de rotura,

norma aplicable, diámetro, altura y masa, con el fin de obtener un informe detallado del ensayo a realizar.

Figura 39. *Ensayo de resistencia a la compresión*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

Seguido, como se evidencia en la figura 39, se acopló el espécimen a la prensa de ensayo y se inició con la aplicación de carga a una velocidad de 0,20 MPa/s. Obtenido el esfuerzo máximo (f'_c), se detuvo el ensayo y se observó el tipo de falla del espécimen. Finalmente, se obtuvo el informe (Formato Excel) que arroja la computadora y así, realizar un análisis más detallado. Finalmente, cabe resaltar que el procedimiento descrito para el ensayo de resistencia a la compresión es válido para los dos tipos de concreto estudiados, tanto para el concreto CAR como para el concreto CAP.

6.3.2.6 Resultados de la actividad 3. En la tabla 19 se muestra el asentamiento obtenido para las mezclas de concreto en estado fresco CAR y CAP. En el caso del concreto CAR el asentamiento medido fue de 20 cm y para concreto CAP, 5 cm.

Tabla 19. *Asentamiento de las mezclas de concreto CAR y CAP*

Referencia		CAR	CAP
<i>Asentamiento</i>	<i>cm</i>	20,00	7,00

Nota: Análisis grupo investigador.

En las tablas 20 y 21 se muestran los datos más relevantes (fechas de elaboración y rotura, edad de curado, geometría, masa, resistencia obtenida y tipo de falla) en el proceso de elaboración y experimentación de las probetas cilíndricas de concreto CAR y CAP, respectivamente, a diferentes edades de curado.

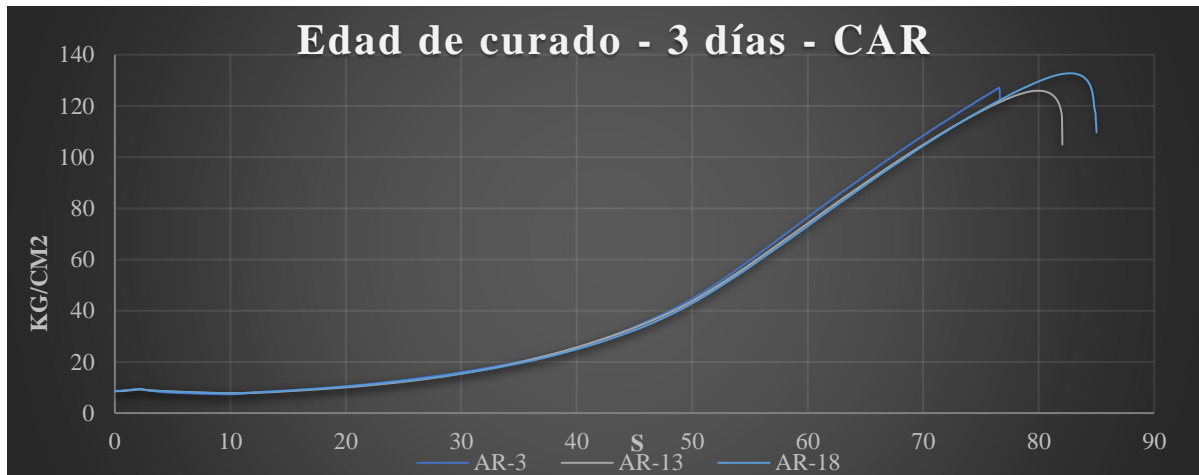
Tabla 20. *Caracterización de los especímenes y $f'c$, concreto CAR*

Fecha		Especímen	Edad de curado	Geometría		Masa	$f'c$	Falla tipo
Elaboración	Rotura			\emptyset	h			
<i>d-mm</i>	<i>d-mm</i>	-	<i>Días</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>Kg</i>	<i>Kg/cm2</i>	-
27-jul	30-jul	AR-3	3	151,00	305,00	13,09	127,17	6
27-jul	30-jul	AR-13	3	152,00	305,00	13,00	125,95	6
27-jul	30-jul	AR-18	3	151,00	306,00	13,05	132,77	6
27-jul	3-ago	AR-1	7	152,00	304,67	12,95	136,38	6
27-jul	3-ago	AR-2	7	150,67	304,33	12,96	145,62	6
27-jul	3-ago	AR-8	7	149,67	303,00	12,55	137,96	6
27-jul	10-ago	AR-5	14	151,33	304,00	12,98	187,37	6
27-jul	10-ago	AR-6	14	151,00	304,33	12,98	191,48	6
27-jul	10-ago	AR-10	14	151,67	303,33	12,97	186,81	6
27-jul	24-ago	AR-14	28	153,00	306,00	13,20	220,87	6
27-jul	24-ago	AR-15	28	150,00	302,33	12,63	205,82	6
27-jul	24-ago	AR-16	28	152,33	305,33	12,96	206,01	6

Nota: Análisis grupo investigador.

En las figuras 40, 41, 42 y 43 se muestra el comportamiento de la resistencia a la compresión de especímenes de concreto CAR respecto al tiempo de ensayo, a edades de curado de 3, 7, 14 y 28 días.

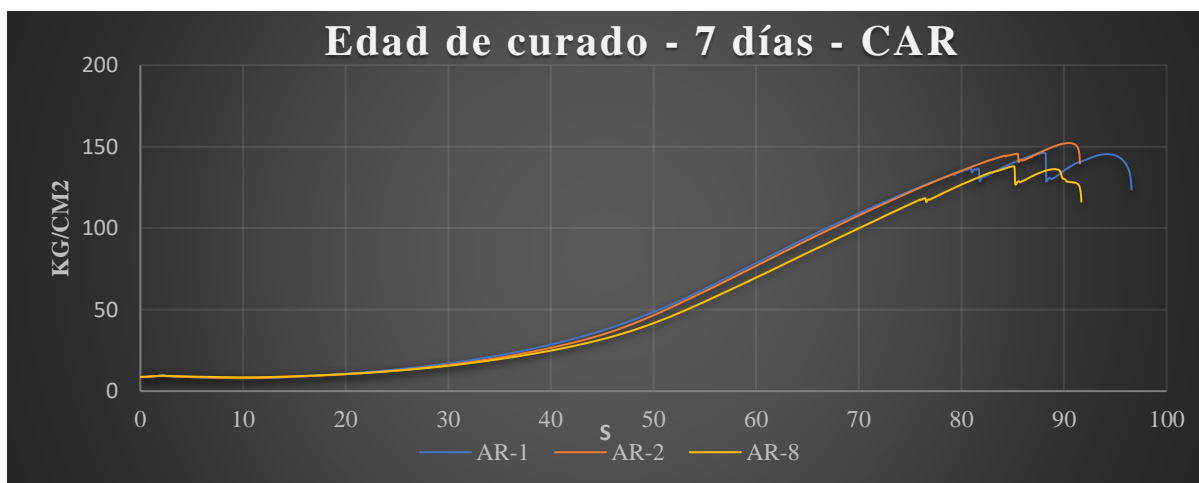
Figura 40. Curva $f'c$ vs t - 3 días, concreto CAR



Nota: Análisis grupo investigador.

Como se muestra en la figura 40, el ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto CAR a la edad de 3 días de curado, arrojó valores de 127,17 Kg/cm², 125,95 Kg/cm² y 132,77 Kg/cm² para las probetas definidas como AR – 3, AR – 13 y AR – 18 respectivamente.

Figura 41. Curva $f'c$ vs t - 7 días, concreto CAR

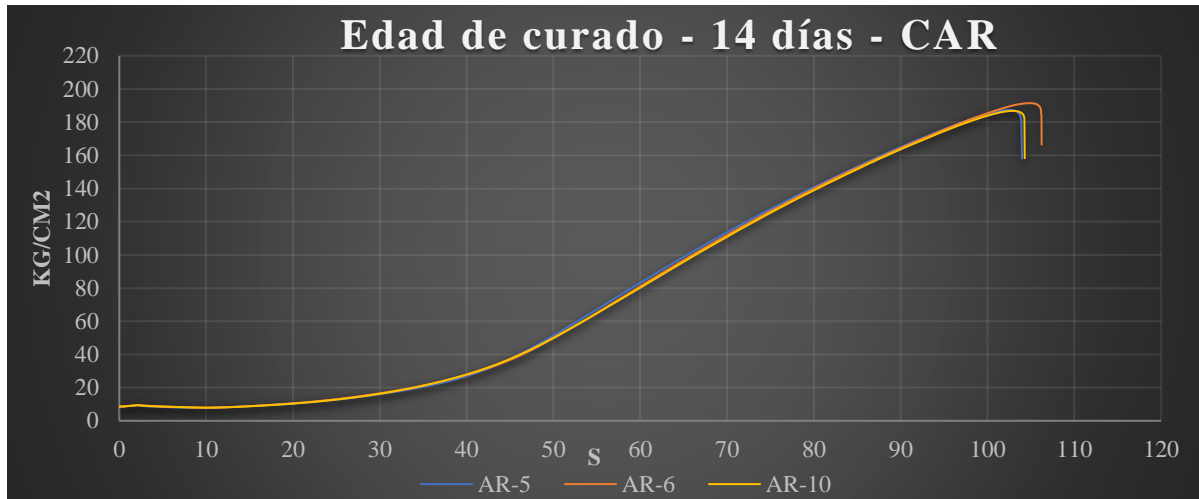


Nota: Análisis grupo investigador.

Como se muestra en la figura 41, el ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto CAR a la edad de 7 días de curado, arrojó valores de

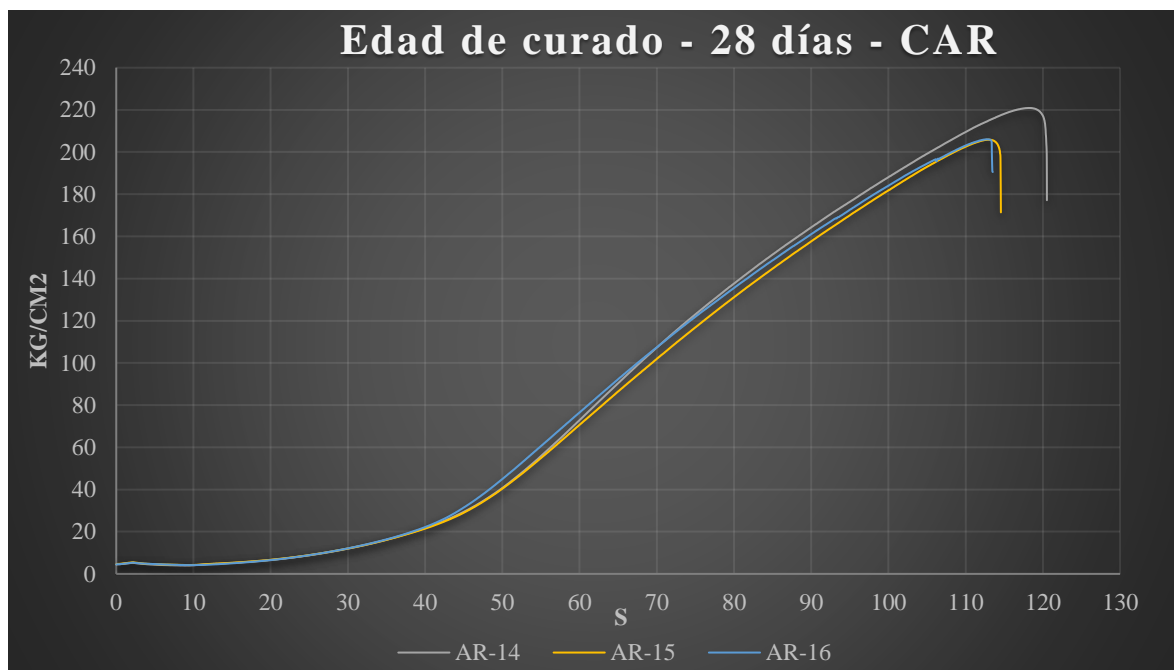
136,38 Kg/cm², 145,62 Kg/cm² y 137,96 Kg/cm² para las probetas definidas como AR – 1, AR – 2 y AR – 8 respectivamente.

Figura 42. Curva $f'c$ vs t - 14 días, concreto CAR



Nota: Análisis grupo investigador.

Figura 43. Curva $f'c$ vs t - 28 días, concreto CAR



Nota: Análisis grupo investigador.

Como se muestra en la figura 42, el ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto CAR a la edad de 14 días de curado, arrojó valores de

187,37 Kg/cm², 191,48 Kg/cm² y 186,81 Kg/cm² para las probetas definidas como AR – 5, AR – 6 y AR – 10 respectivamente.

Como se muestra en la figura 43, el ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto CAR a la edad de 28 días de curado, arrojo valores de 220,87 Kg/cm², 205,82 Kg/cm² y 206,01 Kg/cm² para las probetas definidas como AR – 14, AR – 15 y AR – 16 respectivamente.

Tabla 21. Caracterización de los especímenes y $f'c$, concreto CAP

Fecha		Especímen	Edad de curado	Geometría		Masa	$f'c$	Falla tipo
Elaboración	Rotura			\emptyset	h			
<i>d-mm</i>	<i>d-mm</i>	-	<i>Días</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>Kg</i>	<i>Kg/cm²</i>	-
3-ago	6-ago	AP-14	3	150,67	301,33	12,51	67,24	6
3-ago	6-ago	AP-17	3	151,67	303,33	12,56	64,15	6
3-ago	6-ago	AP-18	3	151,67	302,67	12,60	63,11	6
3-ago	10-ago	AP-12	7	152,00	305,00	12,71	91,62	6
3-ago	10-ago	AP-15	7	151,00	304,00	12,61	96,15	6
3-ago	10-ago	AP-16	7	151,67	302,67	12,73	95,85	6
3-ago	17-ago	AP-6	14	151,00	302,67	12,62	102,07	6
3-ago	17-ago	AP-9	14	152,33	302,67	12,90	100,04	6
3-ago	17-ago	AP-10	14	151,00	304,00	12,60	100,17	6
3-ago	31-ago	AP-1	28	151,67	305,00	12,61	109,55	6
3-ago	31-ago	AP-2	28	151,00	304,00	12,33	107,62	6
3-ago	31-ago	AP-3	28	153,00	306,00	12,68	106,77	6

Nota: Análisis grupo investigador.

En las figuras 44, 45, 46 y 47 se muestra el comportamiento de la resistencia a la compresión de especímenes de concreto CAR respecto al tiempo de ensayo, a edades de curado de 3, 7, 14 y 28 días.

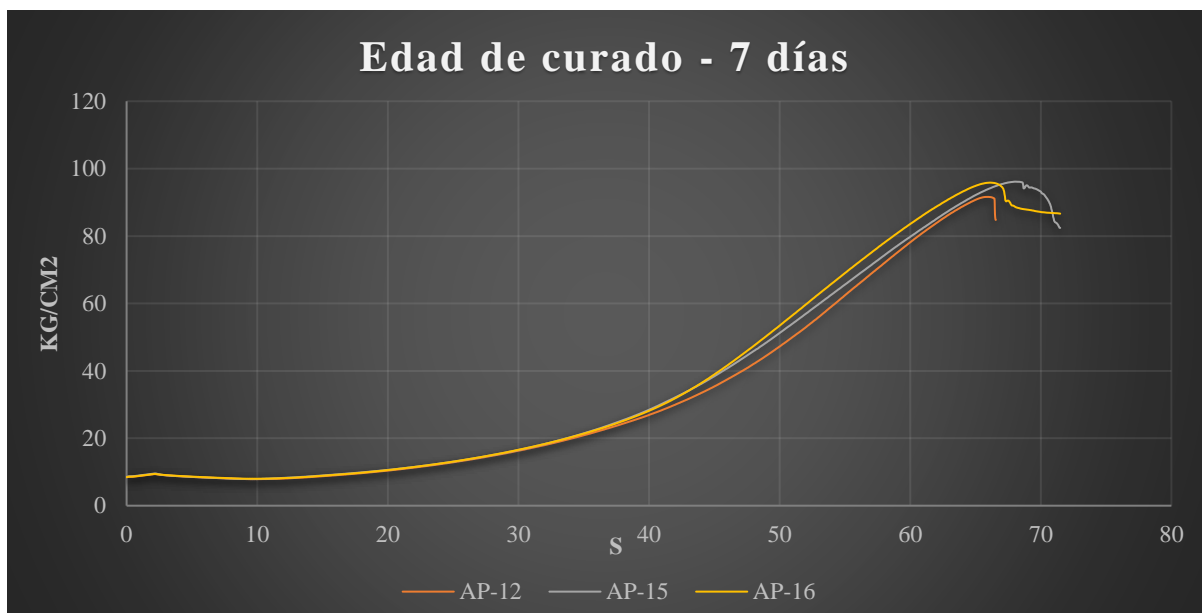
Figura 44. Curva $f'c$ vs t - 3 días, concreto CAP



Nota: Análisis grupo investigador.

Como se muestra en la figura 44, el ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto CAP a la edad de 3 días de curado, arrojó valores de 67,24 Kg/cm², 64,15 Kg/cm² y 63,11 Kg/cm² para las probetas definidas como AP – 14, AP – 17 y AP – 18 respectivamente.

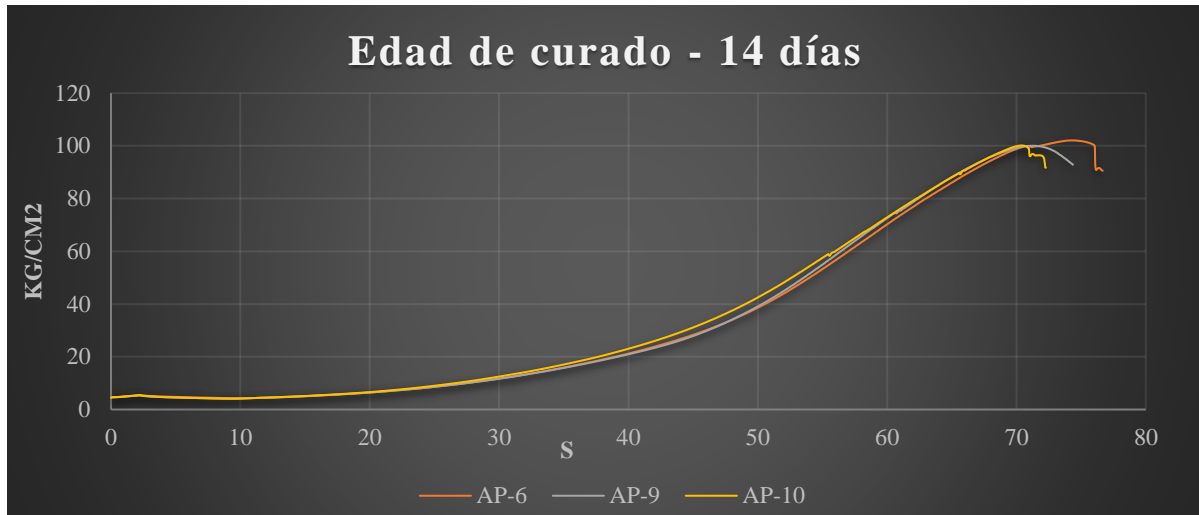
Figura 45. Curva $f'c$ vs t - 7 días, concreto CAP



Nota: Análisis grupo investigador.

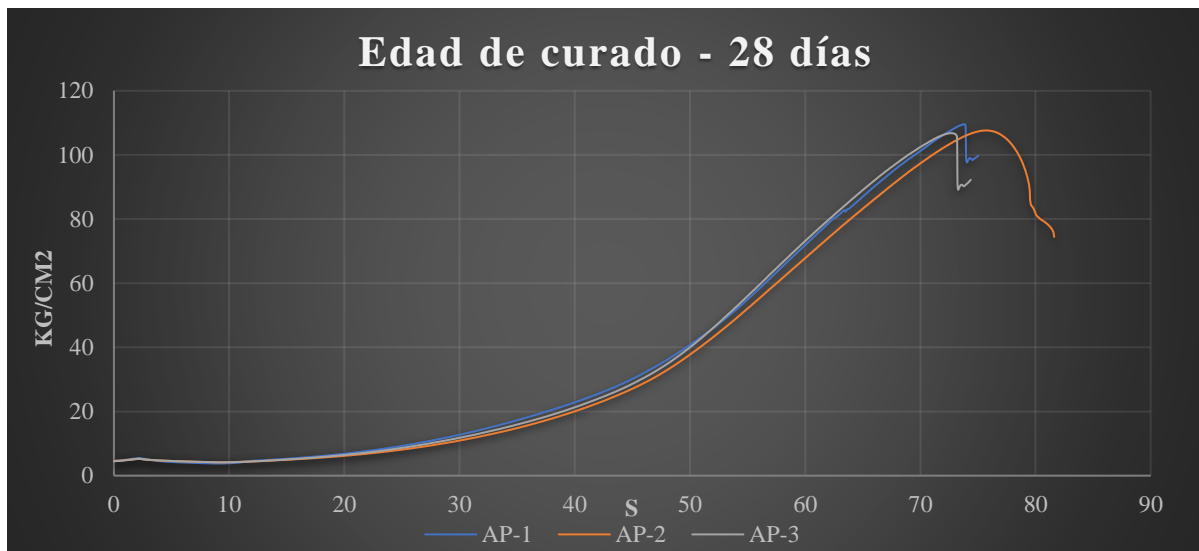
Como se muestra en la figura 45, el ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto CAP a la edad de 7 días de curado, arrojo valores de 91,62 Kg/cm², 96,15 Kg/cm² y 95,85 Kg/cm² para las probetas definidas como AP – 12, AP – 15 y AP – 16 respectivamente.

Figura 46. Curva $f'c$ vs t - 14 días, concreto CAP



Nota: Análisis grupo investigador.

Figura 47. Curva $f'c$ vs t - 28 días, concreto CAP



Nota: Análisis grupo investigador.

Como se muestra en la figura 46, el ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto CAP a la edad de 14 días de curado, arrojo valores de 102,07 Kg/cm², 100,04 Kg/cm² y 100,17 Kg/cm² para las probetas definidas como AP – 6, AP – 9 y AP – 10 respectivamente.

Como se muestra en la figura 47, el ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto CAP a la edad de 28 días de curado, arrojo valores de 109,55 Kg/cm², 107,62 Kg/cm² y 106,77 Kg/cm² para las probetas definidas como AP – 1, AP – 2 y AP – 3 respectivamente.

Cabe resaltar que a los valores de resistencia a la compresión (f'_c) tanto para el concreto CAR y CAP expresados en las tablas 20 y 21, el factor de corrección es igual a 1, ya que la relación de la altura (h) con respecto al diámetro (\emptyset) es mayor a 2 en la totalidad de los especímenes.

Por otro lado, la densidad promedio obtenida para el concreto CAR es de 2360 Kg/m³ y para el concreto CAP de 2310 Kg/m³. Partiendo de lo expresado anteriormente, la referencia CAR se aproxima más a la densidad teórica del concreto, 2400 Kg/m³, y la referencia CAP es un poco más ligero, sin embargo, se encuentra dentro del rango establecido por la normativa aplicable.

7. Discusión

7.1 Trabajabilidad

El concreto CAR en estado fresco, según su asentamiento (20 cm) clasifica como una mezcla de consistencia muy húmeda (> 15 cm), diferente a la consistencia media (5 – 10 cm) esperada en el diseño de la mezcla [1]. Este comportamiento se le atribuye al alto módulo de finura de la arena AR (3,66), lo cual genera menor área superficial, mayor agua libre y directamente una mayor fluidez de la mezcla [28]. Además, este módulo de finura excede el

límite máximo (3,1) establecido por la NTC 174. Sin embargo, la trabajabilidad de la mezcla facilitó el proceso de vaciado.

En el proceso de mezclado del concreto CAP se evidenció la ausencia de homogeneidad en la mezcla al implementar la dosificación estándar, más aún, al agregar 4 litros de agua para solventar la falta de manejabilidad, el concreto CAP clasifica como una mezcla de consistencia media (5 – 10 cm). Según investigaciones llevadas a cabo por Dammika Wellala en el 2021, la baja trabajabilidad se le atribuye al aumento de áreas superficiales ocupadas por finos pasantes del tamiz No 200. La presencia de los finos en agregados AP se observó en el lavado de esta antes del tamizaje, como se muestra en la figura 48. [28]

Figura 48. *Finos pasantes de la malla No. 200, arena AP*



Nota: Registro fotográfico del grupo investigador.

7.2 Resistencia a la compresión

En las tablas 22 y 23 se identifica la resistencia a la compresión de los especímenes para cada edad de curado del concreto CAR y CAP, respectivamente. Además, se datan medidas de variabilidad (desviación estándar y el coeficiente de variación) y resistencias promedio, resultantes de un análisis estadístico de los datos.

Tabla 22. Datos estadísticos (*S*, *CV* y *f'c* promedio), concreto CAR

Espécimen	Edad de curado	f'c	S	CV	f'c promedio
-	<i>Días</i>	<i>Kg/cm2</i>	-	-	<i>Kg/cm2</i>
AR-3	3	127,17			
AR-13	3	125,95	3,64	2,83%	128,63
AR-18	3	132,77			
AR-1	7	136,38			
AR-2	7	145,62	4,94	3,53%	139,98
AR-8	7	137,96			
AR-5	14	187,37			
AR-6	14	191,48	2,55	1,35%	188,56
AR-10	14	186,81			
AR-14	28	220,87			
AR-15	28	205,82	8,63	4,09%	210,90
AR-16	28	206,01			

Nota: Análisis grupo investigador.

Los resultados en el concreto CAR expresados en la tabla 22 presentan un CV de 2,83%, 3,53%, 1,35% y 4,09% para las edades de 3, 7, 14 y 28 días, respectivamente; por su parte, el concreto CAP presenta un CV de 3,31%, 2,68%, 1,13% y 1,32%, como se enuncian en la tabla 23.

En cuanto a la normativa, el coeficiente de variación máximo es de 7,8% cuando se toman 3 especímenes (150x300mm) como objeto de estudio para cada edad de curado, según lo expresado por la NTC 673. Por consiguiente, la variabilidad de los datos tomados como referencia para el concreto CAR y CAP son inferiores al coeficiente de variación máximo (7,8%) expuesto por la NTC 673.

Tabla 23. Datos estadísticos (*S*, *CV* y *f'c* promedio), concreto CAP

Espécimen	Edad de curado	f'c	S	CV	f'c promedio
-	<i>Días</i>	<i>Kg/cm2</i>	-	-	<i>Kg/cm2</i>
<i>AP-14</i>	3	67,24			
<i>AP-17</i>	3	64,15	2,15	3,31%	64,83
<i>AP-18</i>	3	63,11			
<i>AP-12</i>	7	91,62			
<i>AP-15</i>	7	96,15	2,53	2,68%	94,54
<i>AP-16</i>	7	95,85			
<i>AP-6</i>	14	102,07			
<i>AP-9</i>	14	100,04	1,14	1,13%	100,76
<i>AP-10</i>	14	100,17			
<i>AP-1</i>	28	109,55			
<i>AP-2</i>	28	107,62	1,42	1,32%	107,98
<i>AP-3</i>	28	106,77			

Nota: Análisis grupo investigador.

Por otro lado, la resistencia a la compresión para el concreto CAP disminuye alrededor de 63,6 Kg/cm² para los 3 días de curado, 45,44 Kg/cm² para los 7 días, 87,80 Kg/cm² para los 14 días y 102,98 Kg/cm² para los 28 días con respecto a los valores obtenidos para la mezcla de concreto CAR, los cuales fueron 128,63 Kg/cm², 139,98 Kg/cm², 188,56 Kg/cm² y 210,90 Kg/cm² para los 3, 7, 14 y 28 días de curado, respectivamente. La reducción considerable en la resistencia se refleja en el diagrama de barras comparativo de la figura 49.

Figura 49. Diagrama de barras comparativo, $f'c$ respecto al tiempo



Nota: Análisis grupo investigador.

Así mismo, en la tabla 24 se muestra la resistencia promedio obtenida para cada edad de curado y el porcentaje alcanzado en las mezclas CAR y CAP con respecto a la resistencia teórica de diseño igual a 215 Kg/cm2.

Tabla 24. Porcentaje de resistencia obtenido, concreto CAR y CAP

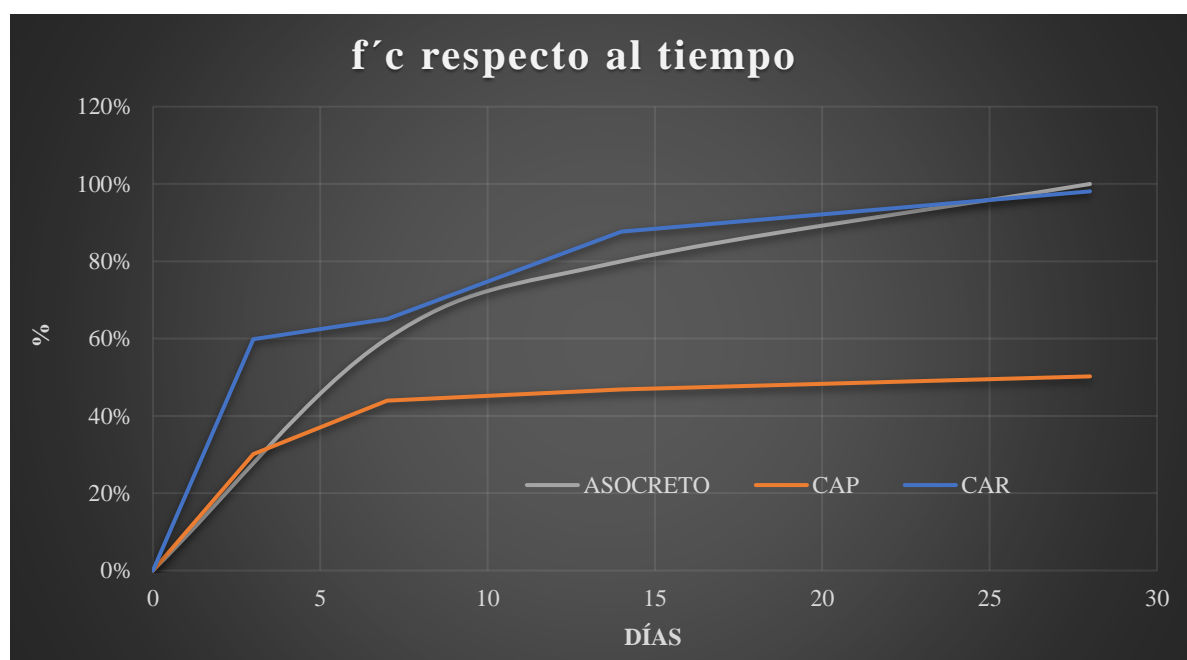
$f'c$ teórico = 215 Kg/cm2	Concreto CAR		Concreto CAP		
	Edad de curado	$f'c$ promedio Porcentaje obtenido	$f'c$ promedio Porcentaje obtenido	Porcentaje obtenido	
	Días	Kg/cm2	-	Kg/cm2	-
	3	128,63	60%	64,83	30%
	7	139,98	65%	94,54	44%
	14	188,56	88%	100,76	47%
	28	210,90	98%	107,98	50%

Nota: Análisis grupo investigador.

Teniendo en cuenta la información en la tabla 24, se observa como el concreto CAR obtuvo un 60%, 65%, 88% y 98% de la resistencia a diseño (215 Kg/cm2) para edades de

curado de los 3, 7, 14 y 28 días de curado, respectivamente. Por otro lado, el concreto CAP alcanzó porcentajes de 30%, 44%, 47% y 50% respecto al diseño para las edades de curado mencionadas anteriormente.

Figura 50. Grafica comparativa de porcentaje obtenido respecto al tiempo



Nota: Análisis grupo investigador.

Por otra parte, en la figura 50 se muestra el comportamiento de la resistencia con respecto al tiempo curado del concreto CAR y CAP en comparación con porcentajes mínimos presentados por la Asociación Colombiana de Productores de Concreto (Asocreto).

La Asociación Colombiana de Productores de Concreto sugiere porcentajes de 60%, 80% y 100% para edades de curado de 7, 14 y 28 días, respectivamente. Como se expone en la figura 50, el concreto CAR alcanza porcentajes superiores a los 3, 7 y 14 días con respecto a la curva referencia de Asocreto, sin embargo, a los 28 días se encuentra un 2% por debajo de esta, alcanzando un 98% de la resistencia de diseño.

Por otro lado, el concreto CAP asemeja el comportamiento de la curva referencia hasta los 3 días con un 30%, edades posteriores muestran porcentajes entre un 44% y 50%, con

respecto a la resistencia de diseño. Al comparar el concreto CAP respecto a la referencia CAR, se evidencia la disminución de la resistencia de 30%, 21% y 41% a edades de curado de los 3, 7 y 14 días, respectivamente. Con respecto a la edad de curado de la resistencia de diseño (28 días), el concreto CAP experimenta una disminución del 48% con respecto al concreto CAR. En la figura 50 se evidencia la gran disminución de la resistencia a la compresión en mezclas de concreto CAP, con respecto al concreto CAR y valores referencia de Asocreto.

8. Conclusiones

Al reemplazar en su totalidad los agregados de río por agregados de peña, sin modificar el diseño de mezcla original ($f'c=215 \text{ Kg/cm}^2$), la resistencia final a la compresión, a 28 días, disminuye 48% y 50% con respecto a la resistencia final del concreto CAR y la resistencia de diseño, respectivamente.

Los agregados pétreos AR (Arenera Chicamocha SAS) y AP (Cantera La Roca y Arenera Dubai) establecidos como objeto de estudio, no cumplen en su totalidad con los parámetros regidos por las Normas Técnicas Colombianas (NTC) e INVIAS, para agregados empleados en la fabricación de concreto.

De acuerdo con las propiedades de los agregados AR, la dosificación estándar es: cemento – 0,12 m³, arena AR – 0,36 m³, grava AR – 0,32 m³ y agua – 0,2 m³. Así mismo, la relación (volumen de material / volumen de cemento requerido) es de 1,0 : 3,2 : 2,8 : 1,7 para el cemento, arena AR, grava AR y agua, respectivamente.

Al implementar la dosificación estándar en la mezcla de concreto CAP, presenta una trabajabilidad baja, por lo cual, se hace indispensable adicionar agua (4 Litros). Dicho comportamiento se le atribuye a la variación en las características de los agregados AP con respecto a los AR, como la absorción de la arena (1,1%) y el equivalente de arena (30%),

generando así una mezcla con exceso de finos, los cuales disminuyen la velocidad de hidratación del cemento, modificando la resistencia de diseño.

El concreto CAP presenta una densidad promedio de 2304 Kg/m³, generando así un concreto más ligero en un 4% y 2.5% con respecto a la densidad teórica del material, 2400 Kg/m³; y la densidad promedio del concreto CAR, 2364 Kg/m³, respectivamente.

Considerando los resultados obtenidos, se puede inferir que los agregados pétreos usualmente comercializados en Barbosa – Santander, no pueden considerarse como una alternativa de reemplazo total de los materiales de río comúnmente utilizados en el área metropolitana de Bucaramanga, debido a la alta disminución en la resistencia y la baja trabajabilidad del material en estado fresco.

Referencias

- [1] Asocreto, *Tecnología del concreto - Tomo 1*, 3ª Ed. Bogotá, 2010.
- [2] L. Gutiérrez de López, *El concreto y otros materiales para la construcción*, 2ª Ed. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- [3] K. J. Torres, *Evaluación de la influencia en la resistencia del concreto $f'c = 140 \text{ kg/cm}^2$, $f'c = 175 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ usando agregado de río o agregado de cerro en Cajamarca*. Cajamarca, 2015.
- [4] M. L. Abril and A. M. Ramos, "Identificación de la variación en la resistencia del concreto debido al origen del agregado grueso," Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, 2017. [En Línea] Disponible en: <http://hdl.handle.net/10983/15280>
- [5] G. Belito and F. Paucar, "Influencia de agregados de diferentes procedencias y diseño de mezcla sobre la resistencia del concreto," Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Huancavelica, Huancavelica, 2018. [En Línea] Disponible en: <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1581>
- [6] A. Suarez and J. Malagón, "Comparación de la calidad de las propiedades de los agregados disponibles para el concreto," Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2012. [En Línea] Disponible en: <http://hdl.handle.net/20.500.11912/1822>
- [7] J. C. McCormac and R. H. Brown, *Diseño de concreto reforzado*, 8ª Ed. México: Alfaomega Grupo Editor S.A., 2011.
- [8] AIS, "Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente - NSR-10," Bogotá: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010.
- [9] B. Mollo and J. Rosas, "Influencia del agregado grueso sobre las propiedades del concreto de resistencia $f'c=210 \text{ Kg/cm}^2$," Tesis de pregrado, Universidad Nacional de

- San Agustín de Arequipa, Arequipa, 2019. [En Línea] Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10564>
- [10] F. Lamus Báez, *Concreto reforzado: fundamentos*. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2016. [En Línea] Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/usta/titulos/70445>
- [11] M. Setareh and R. Darvas, *Concrete Structures*, 2ª Ed. Cham: Springer, 2017. [En línea] Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24115-9>
- [12] A. Surahyo, *Concrete Construction: Practical Problems and Solutions*. Cham: Springer, 2019. [En línea] Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-10510-5>
- [13] C. A. Larsson, *Hormigón armado y pretensado*. Córdoba: Jorge Sarmiento Editor - Universitas, 2020. [En Línea] Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/usta/titulos/172321>
- [14] D. Peña, *Fundamentos de estadística*. Madrid: Difusora Larousse - Alianza Editorial, 2015. [En Línea] Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/usta/titulos/45429>
- [15] R. Matus, *Estadística*. México: Instituto Politécnico Nacional, 2010. [En Línea] Disponible en: <https://elibro.net/es/lc/usta/titulos/76119>
- [16] E. Rivva, “Naturaleza y materiales del concreto,” 2000.
- [17] N. T. Colombiana, *NTC 174: Especificaciones de los agregados para concreto*. Bogotá, 2018.
- [18] N. T. Colombiana, *NTC 77: Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos*. Bogotá, 2018.
- [19] N. T. Colombiana, *NTC 237. Método para determinar la densidad y la absorción del agregado fino*. Bogotá, 2020.
- [20] N. T. Colombiana, *NTC 176: Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso*. Bogotá, 2019.
- [21] N. T. Colombiana, *NTC 92: Método de ensayo para la determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados*. Bogotá, 2019.

- [22] N. T. Colombiana, *NTC 1776: Método de ensayo para determinar el contenido total de humedad evaporable por secado de los agregados*. Bogotá, 2019.
- [23] Invias, *INV E-133: Equivalente de arena de suelos y agregados finos*. 2013.
- [24] Invias, *INV E-218: Resistencia a la degradación de los agregados de tamaños menores a 37.5mm (1 1/2") por medio de la máquina de los Ángeles*. 2013.
- [25] N. T. Colombiana, *NTC 1377: Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio*. Bogotá, 2010.
- [26] N. T. Colombiana, *NTC 396: Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto*. Bogotá, 2018.
- [27] N. T. Colombiana, *NTC 673: Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto*. Bogotá, 2010.
- [28] D. P. K. Wellala, A. K. Saha, P. K. Sarker, and V. Rajayogan, "Fresh and hardened properties of high-strength concrete incorporating byproduct fine crushed aggregate as partial replacement of natural sand," *Front. Struct. Civ. Eng.*, 2021, doi: 10.1007/s11709-020-0673-9.

Apéndices

Apéndice A. *Resultados – caracterización de agregados y diseño de mezcla estándar*

Nota: Véase archivo en fuente externa:

RESULTADOS CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS Y DISEÑO DE MEZCLA ESTÁNDAR (Archivo comprimido)

Apéndice B. *Resultados – ensayos a la compresión*

Nota: Véase archivo en fuente externa:

RESULTADOS ENSAYOS A LA COMPRESION NTC 673 (Archivo comprimido)

Apéndice C. *Evidencia fotográfica de la investigación*

Nota: Véase archivo en fuente externa:

REGISTRO FOTOGRAFICO DEL PROYECTO (Archivo comprimido)