



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 18 de mayo del 2022

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Diego Armando Medina Herrera con C.C. No.1075305882,

Edinson Trujillo Cortes, con C.C. No.1075307331,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado “Estudio del comportamiento físico mecánico del concreto con resina de poliéster y agregado grueso reciclado de concreto”

presentado y aprobado en el año 2022 como requisito para optar al título de

Ingeniero Civil;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores”, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma: Diego Armando Medina H

Firma: 



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: Estudio del comportamiento físico mecánico del concreto con resina de poliéster y agregado grueso reciclado de concreto

AUTOR O AUTORES:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Medina Herrera	Diego Armando
Trujillo Cortes	Edinson

DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Duarte Toro	Mauricio

ASESOR (ES):

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

PARA OPTAR AL TÍTULO DE: Ingeniero civil

FACULTAD: Facultad de ingeniería

PROGRAMA O POSGRADO: Ingeniería civil

CIUDAD: Neiva

AÑO DE PRESENTACIÓN: 2022

NÚMERO DE PÁGINAS:

TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):

Diagramas_x__ Fotografías_x__ Grabaciones en discos__ Ilustraciones en general_x__ Grabados__
Láminas__ Litografías__ Mapas_x__ Música impresa__ Planos__ Retratos__ Sin ilustraciones__
Tablas o Cuadros_x__

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional www.usco.edu.co, link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	2 de 4
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: Adobe Acrobat Reader DC o cualquier lector de pdf.

MATERIAL ANEXO:

PREMIO O DISTINCIÓN (*En caso de ser LAUREADAS o Meritoria*):

PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Agregado reciclado de concreto.	Recycled coarse aggregate concrete
2. Concreto reciclado.	Recycled concrete
3. Concreto modificado con polímero.	Polymer modified concrete
4. Resina de poliéster.	Polyester resin

RESUMEN DEL CONTENIDO: (Máximo 250 palabras)

La alta demanda de los recursos naturales necesarios para la producción de concreto y la generación elevada de residuos de construcción y demolición, han causado daños medioambientales durante toda la historia, por lo que es pertinente buscar soluciones a esta problemática, siendo el reciclaje de estos materiales una alternativa. Por lo tanto, el presente proyecto se encamina en determinar la resistencia a la compresión y las propiedades físicas en estado endurecido (Densidad y absorción) de concretos con resina de poliéster y agregado grueso reciclado de concreto; para ello, se realizaron probetas cilíndricas con diferentes mezclas de concreto, compuestas por agregado natural (Concreto convencional) y sustitución de agregado grueso natural por agregado grueso reciclado de concreto en cantidades de 20%, 50% y 100% (Concreto reciclado), y adición de 1% y 3% de resina de poliéster, para mejorar las características y propiedades de



los diferentes concretos producidos, denominándolos como concretos modificados con polímeros.

De manera general se evidenció que el uso del agregado grueso reciclado de concreto y la adición de la resina de poliéster mejoró la resistencia a la compresión, donde el concreto con 50% de agregado grueso reciclado de concreto y 1% de resina de poliéster obtuvo la mayor resistencia (34,69 MPa). Por otra parte, la densidad de todos los concretos clasificaron dentro del concreto de peso normal, y en cuanto a la absorción, se presentó un aumento al incorporar el agregado grueso reciclado de concreto y al adicionar la resina de poliéster.

ABSTRACT: (Máximo 250 palabras)

The high demand for natural resources necessary for the production of concrete and the construction and demolition waste production have caused environmental damage throughout history. With this in mind, it is pertinent to seek solutions to this problem, being the recycling of these materials an alternative. Therefore, this project is aimed at determining the compressive strength and physical properties in hardened state (density and absorption) of concrete made up of polyester resin and recycled concrete coarse aggregate. For this purpose, cylindrical specimens were molded with different concrete mixtures, composed of natural aggregate (conventional concrete) and the substitution of natural coarse aggregate by recycled concrete coarse aggregate in quantities of 20%, 50% and 100% (recycled concrete), and adding of 1% and 3% of polyester resin to improve the characteristics and properties of the different concrete pieces produced, denominating them as polymer-modified concretes.

In conclusion, it was found that the use of recycled concrete coarse aggregate and the addition of polyester resin improved the compressive



DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y/O TRABAJOS DE GRADO

CÓDIGO	AP-BIB-FO-07	VERSIÓN	1	VIGENCIA	2014	PÁGINA	4 de 4
---------------	---------------------	----------------	----------	-----------------	-------------	---------------	---------------

strength, wherein the concrete with 50% recycled concrete coarse aggregate and 1% polyester resin obtained the highest strength (34,69 MPa). On the other hand, the density of all the concretes classified within the normal weight, and as for the absorption, there was an increase when incorporating the recycled coarse aggregate of the concrete and when adding the polyester resin.

APROBACION DE LA TESIS

Nombre Presidente Jurado: Mauricio Duarte Toro

Firma

Nombre Jurado: Jorge Luis Almaral Sánchez

Firma

Nombre Jurado: Ulpiano Argote Ibarra

Firma



Estudio del comportamiento físico mecánico del concreto con resina de poliéster y agregado grueso reciclado de concreto

Diego Armando Medina Herrera

Edinson Trujillo Cortes

Universidad Surcolombiana

Facultad de ingeniería, Programa de Ingeniería civil

Neiva, Colombia

2022

Estudio del comportamiento físico mecánico del concreto con resina de poliéster y agregado grueso reciclado de concreto

Diego Armando Medina Herrera

Edinson Trujillo Cortes

Proyecto de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero civil

Director:

MSc. Mauricio Duarte Toro

Línea de Investigación:

Materiales de construcción

Universidad Surcolombiana

Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil

Neiva, Colombia

2022

A Dios por permitirme cumplir cada una de las metas que me propongo en la vida, por darme la fuerza que necesito para afrontar y salir triunfante en las adversidades que se presentan en mi camino.

A mis padres José y Aurora por su amor, comprensión, apoyo incondicional y por permitirme soñar, a mis hermanos por estar conmigo en cada momento, a mis sobrinos por qué me han llenado mis días de alegría y son el futuro del mañana, a mi abuela por su cariño, a mis dos grandes amigos Diego y Edwin por estar ahí siempre y finalmente a mis amigos con quienes compartí este camino de formación profesional en especial a Camila, Viany, Deicy, Edinson, Alfredo y Astrid por luchar juntos para conseguir este logro.

Diego A. Medina Herrera.

A Dios en primer lugar por siempre guiar mi camino y darme las fuerzas necesarias para superar cada uno de obstáculos que se me presentaron en este proceso de formación.

A mis padres Ignacio y Dora por darme su apoyo incondicional e inmenso amor, a mi pareja Nicol por motivarme a ser cada día mejor, por apoyarme siempre y sobre todo en los momentos más difíciles de mi vida y por brindarme ese gran amor, a mi hijo por darme tanta felicidad, fuerzas y por ese amor tan bonito que me anima a salir adelante y nunca desfallecer, a mis hermanos por su cariño, a mis abuelas por siempre estar pendientes de mí y llevarme en sus oraciones, a mis tías por sus consejos y por siempre estar dispuestas ayudarme en todo y nunca dejarme solo, finalmente a los buenos amigos que la vida me puso en este proceso de formación profesional en especial a Diego Medina, Ing. Henry Castillo, Ing. Duvan González y Gustavo Castrillón.

Edinson Trujillo Cortes

Agradecimientos

Los autores del presente proyecto de grado expresan sus más sinceros agradecimientos

A Dios por que fue nuestro motor y nuestro guía, por darnos la fortaleza para afrontar todos los problemas que se nos presentaron en el camino y por permitirnos aprender de nuestros errores, a Él gracias por todos los favores recibidos.

Al Ingeniero MSc. Mauricio Duarte Toro nuestro director por la confianza depositada en nosotros, su comprensión, compromiso, motivación, orientación y apoyo para la realización del presente proyecto.

Al Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez de la Universidad Autónoma de Sinaloa México a quien Dios puso en nuestro camino para marcar el rumbo final en la etapa experimental de nuestro proyecto, a él gracias por su tiempo, dedicación y sus valiosos aportes.

Al Ingeniero Henry Mauricio Castillo y al técnico laboratorista Efrén Mosquera Villareal por estar siempre dispuestos a ayudar.

Al Dr. José Manuel Gómez Soberón de la Universidad Politécnica de Cataluña España por brindarnos acceso a sus estudios, con los cuales se logró ampliar nuestros conocimientos y resolver las inquietudes que se nos fueron presentando.

A nuestros profesores de la Universidad Surcolombiana por haber compartido sus conocimientos para nuestra formación como profesionales.

Resumen

La alta demanda de los recursos naturales necesarios para la producción de concreto y la generación elevada de residuos de construcción y demolición, han causado daños medioambientales durante toda la historia, por lo que es pertinente buscar soluciones a esta problemática, siendo el reciclaje de estos materiales una alternativa. Por lo tanto, el presente proyecto se encamina en determinar la resistencia a la compresión y las propiedades físicas en estado endurecido (Densidad y absorción) de concretos con resina de poliéster y agregado grueso reciclado de concreto; para ello, se realizaron probetas cilíndricas con diferentes mezclas de concreto, compuestas por agregado natural (Concreto convencional) y sustitución de agregado grueso natural por agregado grueso reciclado de concreto en cantidades de 20%, 50% y 100% (Concreto reciclado), y adición de 1% y 3% de resina de poliéster, para mejorar las características y propiedades de los diferentes concretos producidos, denominándolos como concretos modificados con polímeros.

De manera general se evidenció que el uso del agregado grueso reciclado de concreto y la adición de la resina de poliéster mejoró la resistencia a la compresión, donde el concreto con 50% de agregado grueso reciclado de concreto y 1% de resina de poliéster obtuvo la mayor resistencia (34,69 MPa). Por otra parte, la densidad de todos los concretos clasificaron dentro del concreto de peso normal, y en cuanto a la absorción, se presentó un aumento al incorporar el agregado grueso reciclado de concreto y al adicionar la resina de poliéster.

Palabras claves: Agregado grueso reciclado de concreto, concreto reciclado, concreto modificado con polímero, resina de poliéster.

Abstract

The high demand for natural resources necessary for the production of concrete and the construction and demolition waste production have caused environmental damage throughout history. With this in mind, it is pertinent to seek solutions to this problem, being the recycling of these materials an alternative. Therefore, this project is aimed at determining the compressive strength and physical properties in hardened state (density and absorption) of concrete made up of polyester resin and recycled concrete coarse aggregate. For this purpose, cylindrical specimens were molded with different concrete mixtures, composed of natural aggregate (conventional concrete) and the substitution of natural coarse aggregate by recycled concrete coarse aggregate in quantities of 20%, 50% and 100% (recycled concrete), and adding of 1% and 3% of polyester resin to improve the characteristics and properties of the different concrete pieces produced, denominating them as polymer-modified concretes.

In conclusion, it was found that the use of recycled concrete coarse aggregate and the addition of polyester resin improved the compressive strength, wherein the concrete with 50% recycled concrete coarse aggregate and 1% polyester resin obtained the highest strength (34,69 MPa). On the other hand, the density of all the concretes classified within the normal weight, and as for the absorption, there was an increase when incorporating the recycled coarse aggregate of the concrete and when adding the polyester resin.

Key words: recycled coarse aggregate concrete, recycled concrete, polymer modified concrete, polyester resin.

Contenido

	Pág.
Resumen	VIII
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de anexos	XVII
Lista de Símbolos y abreviaturas	XVIII
1. Introducción	23
1.1 Antecedentes	26
1.1.1 Concreto con agregado grueso reciclado de concreto	26
1.1.1.1 A nivel internacional	26
1.1.1.2 A nivel nacional	28
1.1.2 Concreto con polímero	28
1.1.2.1 A nivel internacional	28
1.1.2.2 A nivel nacional	30
1.2 Planteamiento del problema	31
1.3 Objetivos	33
1.3.1 Objetivo general	33
1.3.2 Objetivos específicos	33
1.4 Justificación	34
1.5 Estructura del documento	35
2. Marco teórico	37
2.1 Concreto	37
2.1.1 Definición	37
2.1.2 Propiedades del concreto	37
2.1.2.1 Propiedades en estado fresco	38
2.1.2.2 Propiedades en estado endurecido	39
2.2 Concreto Reciclado	40
2.2.1 Definición	40

2.2.2	Agregados reciclados de concreto	41
2.2.2.1	Tratamiento del agregado.....	42
2.2.2.2	Propiedades y características del AGR-C	42
2.2.3	Propiedades del concreto reciclado en estado fresco	45
2.2.3.1	Consistencia	45
2.2.3.2	Trabajabilidad.....	45
2.2.3.3	Densidad	46
2.2.4	Propiedades del concreto reciclado en estado endurecido	46
2.2.4.1	Resistencia a la compresión	46
2.2.4.2	Durabilidad	48
2.2.5	Normatividad vigente en Colombia para el uso de AGR en el concreto	49
2.3	Polímeros	50
2.3.1	Definición.....	50
2.3.2	Características de los polímeros	50
2.4	Resina de poliéster	50
2.4.1	Iniciador y Acelerante	51
2.4.2	Monómero de estireno	52
2.5	Concreto con polímeros.....	52
2.5.1	Concreto modificado con polímero (CMP)	53
2.5.1.1	Definición	53
2.5.1.2	Características.....	53
2.5.1.3	Aplicaciones y limitaciones	54
3.	Metodología	55
3.1	Diseño de la investigación	55
3.2	Hipótesis de investigación	56
3.3	Identificación de Variables	56
3.4	Procedimiento experimental	57
3.4.1	Procedencia de los materiales.....	57
3.4.1.1	Agregados naturales	57
3.4.1.2	Agregado grueso reciclado de concreto.....	58
3.4.1.3	Cemento.....	59
3.4.1.4	Resina de poliéster (RP-055T).....	59
3.5	Caracterización de los agregados.....	59
3.5.1	Ensayo granulométrico.....	59
3.5.2	Ensayo para determinar la humedad.....	60
3.5.3	Ensayo para determinar la densidad relativa y la absorción.....	61
3.5.4	Ensayo para determinar la masa unitaria y vacíos en los agregados.....	61
3.5.5	Ensayo para determinar por lavado el material que pasa el tamiz No 200	62
3.5.6	Porcentaje de materiales no correspondientes al AGR-C.....	63
3.6	Características de los materiales aglutinantes.....	65

3.6.1	Características del cemento	65
3.6.2	Características de la resina de poliéster	66
3.7	Diseño de mezclas de concreto	66
3.8	Clasificación y dosificación de los concretos estudiados.....	69
3.9	Elaboración y curado de muestras de concreto	71
3.10	Resistencia a la compresión	75
3.11	Densidad y absorción del concreto endurecido	75
4.	Análisis de resultados	77
4.1	Resistencia a la compresión	78
4.1.1	Resistencia a la compresión a los 7 días.....	78
4.1.2	Resistencia a la compresión a los 14 días	80
4.1.3	Resistencia a la compresión a los 28 días	83
4.1.4	Resistencia a la compresión a través del tiempo	87
4.2	Densidad aparente y absorción del concreto en estado endurecido.....	90
5.	Conclusiones y recomendaciones	94
5.1	Conclusiones.....	94
5.2	Recomendaciones.....	95
	Bibliografía	97

Lista de figuras

	Pág.
Figura 3-1: Ubicación de la planta trituradora MASSEO.....	57
Figura 3-2: Ubicación de la planta de trituración Reciclados Industriales.	58
Figura 3-3: Tamizadora.	60
Figura 3-4: Secado del material en el horno.	60
Figura 3-5: Montaje para determinar masa aparente en agua.	61
Figura 3-6: Molde y pisón para ensayo de humedad superficial.....	61
Figura 3-7: (a) Peso de la muestra de arena despues de apisonada. (b) Apisonamiento del agregado grueso.	62
Figura 3-8: (a) Proceso de lavado del agregado fino. (b) Proceso de lavado del agregado grueso.	63
Figura 3-9: Materiales retirados del AGR-C.....	64
Figura 3-10: Diseño de mezcla método ACI 211.1-91 (2009).	67
Figura 3-11: (a) Apariencia de mortero con adición de resina de poliéster, (b) Moldeo de cubos de mortero con resina de poliéster, (c) Cubos de mortero con resina de poliéster. ...	68
Figura 3-12: Agregado grueso reciclado de concreto saturado superficialmente seco.....	71
Figura 3-13: (a) Materiales utilizados para concretos reciclados. (b) Resina de poliéster con catalizador Mek-peróxido.	72
Figura 3-14: Proceso de mezclado.	73
Figura 3-15: Ejecución ensayo de asentamiento.	73
Figura 3-16: Medición del asentamiento.....	73
Figura 3-17: Almacenamiento de los especímenes de concreto.....	74
Figura 3-18: Cilindro de concreto cubierto con plástico.....	74
Figura 3-19: Curado por inmersión de los especímenes de concreto.....	74
Figura 3-20: (a) Ensayo resistencia a compresión. (b) Especímenes de concreto fallados. 75	75
Figura 3-21: (a) Corte de cilindros de concreto. (b) Muestra de concreto con agregado reciclado.	76
Figura 3-22: (a) Muestras de concreto secas. (b) Muestras de concreto sumergidas en agua. (c) Muestras de concreto ebulidas. (d) Peso sumergido en agua.	76
Figura 4-1: Resistencia a la compresión a los 7 días de curado.....	80
Figura 4-2: Resistencia a la compresión a los 14 días de curado.	82

Figura 4-3: Resistencia a la compresión a los 28 días de curado.....	85
Figura 4-4: Relación entre la resistencia a la compresión a los 28 días de curado y el porcentaje de adición de resina de poliéster.....	87
Figura 4-5: Evolución de la resistencia a la compresión para los CR.....	88
Figura 4-6: Evolución de la resistencia a la compresión de los CMP.....	88
Figura 4-7: Evolución de la Resistencia a la compresión para los CRMP.....	89
Figura 4-8: Densidad aparente de los diferentes tipos de concreto en estado endurecido.	91
Figura 4-9: Variación del porcentaje de absorción de los diferentes tipos de concreto.	92
Figura E-1: Gráfico para diagnóstico de linealidad en el modelo 1.....	140
Figura E-2: Gráfico para diagnóstico de normalidad en el modelo 1.....	140
Figura E-3: Gráfico para diagnóstico de varianza constante en el modelo 1.....	140
Figura E-4: Gráfico para diagnóstico de independencia en el modelo 1.....	140
Figura E-5: Gráfico para diagnóstico de linealidad en el modelo 2.....	141
Figura E-6: Gráfico para diagnóstico de normalidad en el modelo 2.....	141
Figura E-7: Gráfico para diagnóstico de varianza constante en el modelo 2.....	141
Figura E-8: Gráfico para diagnóstico de independencia en el modelo 2.....	141
Figura E-9: Gráfico para diagnóstico de linealidad en el modelo 3.....	142
Figura E-10: Gráfico para diagnóstico de normalidad en el modelo 3.....	142
Figura E-11: Gráfico para diagnóstico de varianza constante en el modelo 3.....	142
Figura E-12: Gráfico para diagnóstico de independencia en el modelo 3.....	142
Figura F-1: Variación de costos de los diferentes tipos de concreto.....	145
Figura G-1: Cuarteo de la muestra de AGR-C.....	147
Figura G-2: Materiales listos para la mezcla de concreto.....	147
Figura G-3: Elaboración de muestras cilíndricas.....	147
Figura G-4: Determinación del asentamiento en las mezclas de concreto.....	147
Figura G-5: Muestras de cilindros de concreto en estado fresco.....	147
Figura G-6: Curado inicial con plástico.....	147
Figura G-7: Curado por inmersión.....	147
Figura G-8: Ensayo a la compresión.....	148
Figura G-9: Especímenes de cilindros fallados.....	148
Figura G-10: Presencia de fibras en el concreto.....	148
Figura G-11: Corte de un cilindro de concreto.....	148
Figura G-12: Marcación de cilindros para cortar.....	148
Figura G-13: Cortes de concreto bajo agua.....	148
Figura G-14: Distribución de los agregados gruesos en el concreto.....	148

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 2-1: Resistencia a la compresión del concreto reciclado en función del agregado grueso reciclado	47
Tabla 3-1: Metodología	55
Tabla 3-2: Matriz experimental.....	56
Tabla 3-3: Propiedades físicas de los agregados.....	64
Tabla 3-4: Especificaciones técnicas del cemento Argos de uso general.	65
Tabla 3-5: Especificaciones de la resina de poliéster RP-055T.....	66
Tabla 3-6: Tipos de concretos estudiados.....	69
Tabla 3-7: Dosificación en masa seca para 1m ³ del CT y CR.....	70
Tabla 3-8: Dosificación en masa seca para 1m ³ de concretos modificados con polímeros.	70
Tabla 3-9: Resultado del ensayo de asentamiento de los diferentes tipos de concreto.....	73
Tabla 4-1: Resistencia promedio a la compresión.....	78
Tabla 4-2: Análisis de varianza de los resultados de resistencia a compresión a los 7 días.....	78
Tabla 4-3: Comparación entre las resistencias medias a la compresión a los 7 días de curado, mediante el test HSD de Tukey.	79
Tabla 4-4: Análisis de varianza de los resultados de resistencia a compresión a los 14 días.....	81
Tabla 4-5: Comparación entre las resistencias medias a la compresión a los 14 días de curado, mediante el test HSD de Tukey.	81
Tabla 4-6: Análisis de varianza de los resultados de resistencia a compresión a los 28 días.....	83
Tabla 4-7: Comparación entre las resistencias medias a la compresión a los 28 días de curado, mediante el test HSD de Tukey.	84
Tabla 4-8: Resultados promedios del ensayo de densidad y absorción del concreto en estado endurecido.....	90

Tabla A-1: Análisis granulométrico del AGN.....	108
Tabla A-2: Análisis granulométrico del AGR-C.....	109
Tabla A-3: Análisis granulométrico de la arena.....	110
Tabla A-4: Determinación del porcentaje de humedad del AGN.....	111
Tabla A-5: Determinación del porcentaje de humedad del AGR-C.....	111
Tabla A-6: Determinación del porcentaje de humedad de la arena.....	112
Tabla A-7: Determinación de la densidad y absorción del AGN.....	112
Tabla A-8: Determinación de la densidad y la absorción del AGR-C.....	113
Tabla A-9: Determinación de la densidad y la absorción de la arena.....	113
Tabla A-10: Masa unitaria suelta y masa unitaria compacta del AGN y del AGR-C....	114
Tabla A-11: Masa unitaria suelta y masa unitaria compacta de la arena.....	115
Tabla A-12: Determinación del material que pasa el tamiz No 200 para el AGN.....	115
Tabla A-13: Determinación del material que pasa el tamiz No 200 para el AGR-C.....	116
Tabla A-14: Determinación del material que pasa el tamiz No 200 para la arena.....	116
Tabla A-15: Composición porcentual del AGR-C.....	117
Tabla B-1: Propiedades de los materiales del concreto.....	119
Tabla B-2: Resistencia promedio a la compresión requerida cuando NO hay datos disponibles para el cálculo de la desviación estándar de la muestra (Tabla 5.3.2.2 ACI 318S-05).....	119
Tabla B-3: Recomendaciones de asentamiento para varios tipos de construcción (SI) (Tabla A1.5.3.1 ACI 211.1-91).....	120
Tabla B-4: Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaño nominal máximo de agregado (SI) (Tabla A1.5.3.3 ACI 211.1-91).....	121
Tabla B-5: Relación agua-cemento (a/c) y la resistencia a la compresión del concreto (SI) (Tabla A1.5.3.4 (a) ACI 211.1-91).....	121
Tabla B-6: Volumen del agregado grueso por volumen unitario del concreto (Tabla A1.5.3.6 ACI 211.1-91).....	122
Tabla B-7: Volumen de los componentes (No incluye el volumen del agregado fino). ...	123
Tabla B-8: Masa seca de los agregados en kg para 1 m ³ de concreto.....	123
Tabla B-9: Diseño de mezcla inicial en kg para 1 m ³ de concreto.....	124
Tabla B-10: Proporciones para primera mezcla de prueba.....	125
Tabla B-11: Dosificación en masa seca para 1m ³ del CT y CR.....	127
Tabla B-12: Dosificación en masa seca para 1m ³ de concretos modificados con polímeros.	128
Tabla C-1: Estudio visual del comportamiento de la resina de poliéster en mortero.	131
Tabla D-1: Resultados de f'_c de los diferentes tipos de concreto a los 7 días de curado.	134
Tabla D-2: Resultados de f'_c de los diferentes tipos de concreto a los 14 días de curado.	135
Tabla D-3: Resultados de f'_c de los diferentes tipos de concreto a los 28 días de curado.	136

Tabla D-4: Resultados del porcentaje por absorción de los diferentes tipos de concreto.	137
Tabla D-5: Resultados de densidad aparente de los diferentes tipos de concreto.	138
Tabla F-1: Costo del concreto convencional y los concretos reciclados.	144
Tabla F-2: Costo de los concretos con adición de resina de poliéster.	144

Lista de anexos

	Pág.
A. Anexo: Resultados de los ensayos de caracterización de los agregados.	107
B. Anexo: Diseño de mezcla para un concreto de $f'c$ 28MPa por el método ACI 211.1-91	118
C. Anexo: Experimentación previa para el conocimiento y utilización de la resina de poliéster RP-055T.	129
D. Anexo: Resultados de resistencia a la compresión, densidad y absorción de los diferentes tipos de concreto.	133
E. Anexo: Supuestos estadísticos de los residuales del modelo ajustado (normalidad, varianza constante e independencia)	139
F. Anexo: Estimación de costos de los diferentes tipos de concreto.	143
G. Anexo: Fotografías durante la etapa experimental	146

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
a/c	Relación agua material cementante		Tabla B-5
B	volumen del agregado grueso para un metro cubico de concreto	m^3/m^3	Ecuación B.3
b/b_0	Volumen del agregado grueso varillado (Compactado) en seco por volumen unitario de concreto		Tabla B-6
b_0'	Valor del volumen del agregado grueso por metro cubico de agregado grueso		Ecuación B.2
C_1	Cantidad de cemento inicial en el diseño de mezcla	kg/m^3	Ecuación B.1
C_2	Cantidad de cemento para $1m^3$ de concreto, diseño corregido por asentamiento y masa unitaria	kg/m^3	
f	Cantidad de agregado fino para un volumen especificado de concreto	kg	Ecuación B.7
f'_c	Resistencia especificada a la compresión del concreto	MPa	ver NSR-10
f'_{cr}	Resistencia promedio a la compresión requerida del concreto empleada como base para la dosificación del concreto	MPa	Tabla B-2
F_1	Masa seca del agregado fino	kg/m^3	Tabla B-8
F_2	Cantidad de agregado grueso seco para $1m^3$ de concreto, diseño corregido por asentamiento y masa unitaria	kg/m^3	Ecuación B.13

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
F_{2SSS}	Cantidad de agregado fino saturado superficialmente seco para 1m ³ de concreto, diseño corregido por asentamiento y masa unitaria	kg/m ³	Ecuación B.12
F_h	Cantidad de agregado fino en estado húmedo	kg/m ³	Ecuación B.4
g	Cantidad de agregado grueso para un volumen especificado de concreto	kg	Ecuación B.7
G_1	Masa seca del agregado grueso	kg/m ³	Tabla B-8
G_2	Cantidad de agregado grueso seco para 1m ³ de concreto, diseño corregido por asentamiento y masa unitaria	kg/m ³	Ecuación B.10
G_{2SSS}	Cantidad de agregado grueso saturado superficialmente seco para 1m ³ de concreto, diseño corregido por asentamiento y masa unitaria	kg/m ³	Ecuación B.11
G_{h1}	Cantidad de agregado grueso en estado húmedo	kg/m ³	Ecuación B.5
G_{h2}	Cantidad de agregado grueso húmedo para 1m ³ de concreto, diseño corregido por asentamiento y masa unitaria	kg/m ³	Ecuación B.11
h	Porcentaje de humedad de la arena	%	Tabla B-1
h_a	Porcentaje de humedad por absorción	%	Tabla B-1
R	Rendimiento de la mezcla		Ecuación B.7
vs	Volumen de concreto especificado	m ³	
w	Cantidad de agua para un volumen especificado de concreto	kg	Ecuación B.7
w'	Cantidad de agua adicional para corregir el diseño de mezcla por asentamiento y masa unitaria		Ecuación B.7
W_1	Cantidad de agua inicial en el diseño de mezcla	kg/ m ³	Tabla B-4
W_2	Cantidad de agua para 1m ³ de concreto, diseño corregido por asentamiento y masa unitaria	kg/m ³	Ecuación B.8

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
W_h	Cantidad de agua de mezclado corregida por humedad y absorción de los agregados	kg/m ³	Ecuación B.6

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término
α	Nivel de significancia

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>ACHE</i>	Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural
<i>ACI</i>	Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute)
<i>AGN</i>	Agregado grueso natural
<i>AGR-C</i>	Agregado grueso reciclado de concreto
<i>ANOVA</i>	Análisis de varianza
<i>CIP</i>	Concreto impregnado con polímero
<i>CMP</i>	Concreto modificado con polímero
<i>CMP-1%</i>	Concreto modificado con polímero con 1% de resina de poliéster
<i>CMP-3%</i>	Concreto modificado con polímero con 3% de resina de poliéster
<i>CP</i>	Concreto polimérico
<i>CR</i>	Concreto reciclado
<i>CR100%</i>	Concreto reciclado con 100% de AGR-C
<i>CR20%</i>	Concreto reciclado con 20% de AGR-C
<i>CR50%</i>	Concreto reciclado con 50% de AGR-C
<i>CRMP</i>	Concreto reciclado modificado con polímero
<i>CRMP100%-1%</i>	Concreto reciclado modificado con polímero con 100% de AGR-C y 1% de resina de poliéster

Abreviatura	Término
<i>CRMP100%-3%</i>	Concreto reciclado modificado con polímero con 100% de AGR-C y 3% de resina de poliéster
<i>CRMP20%-1%</i>	Concreto reciclado modificado con polímero con 20% de AGR-C y 1% de resina de poliéster
<i>CRMP20%-3%</i>	Concreto reciclado modificado con polímero con 20% de AGR-C y 3% de resina de poliéster
<i>CRMP50%-1%</i>	Concreto reciclado modificado con polímero con 50% de AGR-C y 1% de resina de poliéster
<i>CRMP50%-3%</i>	Concreto reciclado modificado con polímero con 50% de AGR-C y 3% de resina de poliéster
<i>CT</i>	Concreto testigo o de referencia
<i>EHE-08</i>	Instrucción de hormigón estructural
<i>F</i>	Razón F de Fisher
<i>MF</i>	Módulo de finura
<i>MUC</i>	Masa unitaria compacta
<i>MU_R</i>	Masa unitaria real del concreto fresco
<i>NSR-10</i>	Reglamento colombiano de construcción sismo resistente
<i>NTC</i>	Norma técnica colombiana
<i>PET</i>	Tereftalato de polietileno (Polyethylene terephthalate)
<i>RCD</i>	Residuos de construcción y demolición
<i>SSS</i>	Saturado superficialmente seco
<i>TMN</i>	Tamaño máximo nominal

Capítulo 1

1. Introducción

El concreto desde la antigüedad ha sido un material de gran importancia para la construcción por sus características, propiedades y bajos costos, logrando así complejas y sencillas construcciones en diferentes partes del mundo, convirtiéndose en el material de construcción más utilizado en la actualidad, siendo éste, el causante de grandes impactos ambientales negativos, por un lado, las implicaciones que conllevan la obtención de sus componentes (Enshassi et. al, 2014) y por otro, la mala disposición y manejo de los residuos que genera la misma industria debido a la demolición o destrucción de las estructuras (Nieto, 2015). Con los avances en cuanto a la producción de concreto, desde hace algunos años se ha venido implementando el uso de concretos reciclados (CR), denominados así, por la sustitución parcial o total de sus agregados naturales por agregados reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) (C. García, 2012), siendo la sustitución del agregado grueso natural (AGN) por agregado grueso reciclado de concreto (AGR-C) los de mayor aplicación (Laserna, 2015), con el fin de contribuir en la conservación de los recursos naturales no renovables y el medio ambiente en general.

El aprovechamiento de los AGR-C, para la producción de concreto ha tenido mucha acogida en varios países, tal es el caso de España, Nueva Zelanda, Alemania, Reino Unido, Holanda, Japón y Bélgica, donde se ha regulado el uso de estos materiales en porcentajes que van desde un 20% a un 50 % en sustitución de AGN por AGR-C, pues con estos se garantiza que el CR cumpla con los requisitos establecidos en las diferentes normativas (C. García,

2012; Laserna, 2015; A. López, 2016; Nieto, 2015). Por otro lado, diferentes investigaciones con porcentajes de sustitución más altos o en su totalidad, han demostrado que las propiedades y características de este concreto no presentan mayor variación, indicando que este puede ser utilizado como concreto estructural (Laserna, 2015).

El CR presenta algunas desventajas respecto al concreto convencional debido a la heterogeneidad del AGR-C, pues existen partículas limpias y otras con algún tipo de material diferente adherido en el agregado como lo es el mortero del concreto anterior, afectando las propiedades de este (Navarro, 2014, C. García, 2012). Esto se ha evidenciado en estudios de diferentes autores, donde propiedades como la resistencia a la compresión varía dependiendo en parte de la procedencia del material, ya que si procede de un concreto con buena resistencia esto proporcionará un alto rendimiento en el nuevo concreto. Por otro lado, la absorción y la capilaridad aumentan debido a las nuevas características que tienen los AGR-C, por ejemplo, un aumento en la absorción de agua debido al mortero que se encuentra adherido a este (F. López, 2008).

En Colombia, el aprovechamiento de los RCD no ha sido ajeno, siendo así, que bajo la resolución 472 de 2017 del ministerio de ambiente y desarrollo sostenible se reglamenta la gestión integral de los mismos a nivel nacional, de este modo la ciudad de Neiva se ha acogido a dicha normativa mediante el “plan integral de residuos sólidos 2016-2028” en el inciso 14.11. Además, en algunas regiones del país se ha decretado el uso de estos materiales, tal es el caso de la resolución No 01115 de la secretaria distrital de ambiente en la ciudad de Bogotá, en la cual se decreta el uso de no menos de un 25 % de RCD en las obras civiles.

Así mismo, desde ya hace algunos años Colombia cuenta con diferentes empresas que reciclan y tratan los RCD con el fin de comercializarlos para una reincorporación en la industria de la construcción o en usos externos a ella, tales como Reciclados Industriales, GRECO, CONESCO y SINESCO. Estas empresas producen arenas y gravas para bases, subbases granulares y concreto.

En vista de la variabilidad de las propiedades del CR, principalmente aquellas que producen daños en su estructura, como una baja resistencia, una alta absorción y capilaridad, el uso de polímeros ha sido una alternativa para el mejoramiento de estas propiedades (Aguado y Salla, 1987), Sin embargo, dado que los polímeros presentan un costo elevado, es importante tener en cuenta la cantidad que se requiere dentro de la mezcla de concreto, por ello se han llevado a cabo investigaciones para un óptimo uso de los materiales y sus proporciones en la mezcla (Nodehi, 2021).

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, el presente proyecto tiene como objetivo principal determinar la resistencia a la compresión y propiedades físicas (densidad y absorción) del concreto modificado con resina de poliéster y AGR-C en estado endurecido. Para ello la metodología planteada se divide en diferentes etapas, la primera consistió en recopilar información respecto al tema de estudio, la segunda, corresponde a la fase experimental donde se determinaron las características y propiedades de los materiales a utilizar (Arena, AGN y AGR-C) y de los diferentes concretos producidos (concreto testigo (CT), CR, CMP y concretos reciclados modificados con polímero (CRMP)), además, en esta etapa se especificaron los respectivos diseños de mezcla de los concretos, y por último una etapa de análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones.

De igual forma, el proyecto contribuye en la industria de la construcción, dando un paso importante en la búsqueda de un material compuesto con excelentes propiedades mecánicas y físicas, y que a su vez, reduzca las problemáticas ambientales que se generan en la producción de un concreto convencional, por consiguiente este estudio presenta resultados basados en una resina de poliéster comercial seleccionada y AGR-C, logrando la aceptación o rechazo de estos materiales en futuras investigaciones. Adicionalmente, este proyecto pretende generar interés en la creación de empresas para el reciclaje y tratamiento de RCD y así garantizar su aprovechamiento.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Concreto con agregado grueso reciclado de concreto

1.1.1.1 A nivel internacional

El comportamiento del concreto con AGR-C de residuos de demolición y construcción ha sido investigado desde hace ya décadas.

Martínez (2021) de la Universidad de León (España), estudió el comportamiento de concreto autocompactante con AGR-C, para lo cual reemplazó el AGN por AGR-C en porcentajes de 20%, 50% y 100%, en este estudio se fabricaron cuatro tipos de mezclas, una para cada porcentaje de reemplazo y la del concreto de referencia, con el fin de conocer las propiedades del concreto en estado fresco, como la compactabilidad y en estado endurecido tales como la resistencia a la compresión, a la tracción y a la flexión. Los resultados obtenidos indicaron un aumento de la resistencia a la compresión en las mezclas con reemplazos de 20% y 50% de AGR-C en porcentajes de 20% y 18% respectivamente respecto al concreto de referencia y una disminución del 5% en el concreto con 100% de AGR-C. En cuanto a la resistencia a la tracción, esta disminuyó en comparación con el concreto de referencia y en el caso de la resistencia a la flexión los valores no presentaron una diferencia notable.

Laserna (2015) en la investigación desarrollada en la Universidad de Castilla – La Mancha, abordó el estudio del CR para uso estructural, en el que se analizaron los balances de agua en la mezcla para diferentes mezclas de concreto variando la cantidad de cemento (260, 300 y 340 Kg/m³) y las características del AGN (agregado triturado y rodado, de granulometría continua y discontinua), así como diferentes sustituciones de AGR-C (0%, 20%, 50% y 100%), obteniendo como resultados perfectamente válidos para ser calificados dentro de la resistencia del concreto convencional, también se determinó que para la resistencia a la compresión de los concretos reciclados influye la cantidad de cemento.

Por su parte, Navarro (2014), realizó un estudio de las características del CR, sus propiedades y la normativa aplicable al concreto con agregados reciclados. En esta

investigación se reemplazó el AGN por AGR-C en porcentajes de 15%, 20%, 30% y 50%, los cuales cumplieron con la resistencia requerida, además, comprobó que se puede utilizar el AGR-C en porcentajes mayores a 20%, siendo este porcentaje el recomendado por la normativa española.

Guardian et. al (2021), evaluaron las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto con sustitución del cemento por 35% de cenizas volantes y 15% de catalizador de craqueo catalítico y adicionalmente, sustituyeron el AGN por AGR-C en porcentajes de 20% y 100%, para cada dosificación se elaboraron cuatro probetas cilíndricas de 150 mm x 300 mm de diámetro. Los resultados que obtuvieron muestran una disminución de la resistencia cada vez que se aumenta el porcentaje de AGR-C, pero estos quedaron por encima de los límites establecidos por la normativa española (EHE-08) bajo la cual se desarrolló esta investigación, además, para el caso de la durabilidad se ve afectada por un aumento de la porosidad en los concretos con porcentajes de AGR-C altos.

Así mismo, M. García (2017) de la universidad de Córdoba-España en su estudio reemplazó el 100% de AGN por AGR-C, cuyos resultados no fueron satisfactorios, puesto que las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto disminuyeron, esto se evidenció con la disminución del 15% de la resistencia a la compresión y un aumento en la porosidad y absorción del concreto endurecido.

Fernando López (2008), seleccionó algunos puntos de estudio como lo son la calidad de los AGR-C, el porcentaje de sustitución en la dosificación del concreto con agregados convencionales por agregados reciclados, la resistencia a la compresión y la consistencia de la mezcla, así como las propiedades del concreto como densidad, absorción, módulo de elasticidad, resistencia a la tracción y permeabilidad. Los resultados que se obtuvieron muestran que la densidad y la absorción aumentan cuando el porcentaje de sustitución de AGR-C también lo hace; por otra parte, la sustitución del AGN por AGR-C no mostró cambios considerables en la resistencia a la compresión y en la permeabilidad, sin embargo, la resistencia a la tracción aumentó.

1.1.1.2 A nivel nacional

A nivel nacional, Diosa (2020), evaluó el comportamiento del concreto de alta resistencia con sustitución parcial del AGN por AGR-C en porcentajes de 10%, 20% y 40%. Los resultados en este estudio no mostraron una variación notable en la resistencia a la compresión en aquellos concretos con 10% y 20% de AGR-C, por el contrario, con el 40% de sustitución la resistencia incrementó respecto al concreto de referencia, además, se presentó un menor porcentaje de vacíos en los concretos con AGR-C, con lo que se puede garantizar una excelente durabilidad.

Mora (2016), determinó la resistencia a la compresión del concreto con AGR-C en porcentajes de 25%, 50% y 100%, obteniendo como resultados valores menores al concreto de referencia, siendo el concreto con un reemplazo del 100% quien presentó los valores de resistencia más altos en comparación con los otros porcentajes de reemplazo, también se evidenció un aumento en la absorción de estos concretos.

Por otra lado, Mena y Valdés (2014), sustituyeron 25%, 50% y 100% del AGN por AGR-C para evaluar las propiedades de humedad, absorción, densidad, resistencia a la compresión y a la flexión, llegando a la conclusión que un diseño recomendable para el uso en obras viales de bajo tránsito es al correspondiente de una sustitución del 25% de AGR-C.

1.1.2 Concreto con polímero

1.1.2.1 A nivel internacional

En Bagdad, se estudió recientemente el efecto de la resina de poliéster insaturada como material aglomerante en el concreto con agregados producto de demoliciones y desechos de construcción. Se elaboraron muestras de concreto testigo y otras con porcentajes en peso de resina de 20%, 25% y 30%, se realizaron las respectivas pruebas físicas y mecánicas a cada una de los especímenes, mostrando como resultado que al aumentar la cantidad del polímero aumentan los valores de las propiedades mecánicas (Hameed y Hamza, 2019).

Por su parte, Mendivil, Almaral, Gómez y Cabrera (2017) fabricaron la resina polimérica a base de PET reciclado y la utilizaron como aditivo dentro de un concreto reciclado variando su cantidad en peso respecto al peso del cemento; con ello obtuvieron reducciones de 16,55% y 22% en la porosidad y la absorción respectivamente comparado con el concreto de referencia, además, se evidenció una mejora en la resistencia a la compresión simple, siendo 7% y 9% las cantidades de resina que dieron lugar a un mejor comportamiento de esta propiedad.

En Chile, Lara (2016), realizó mezclas de concreto utilizando cemento Portland Puzolánico, agua, arena, agregado grueso, fibras sintéticas, diferentes porcentajes de aditivo polimérico ETONIS 850 (0%, 3%, 5% y 7%) siendo este el material objeto de estudio, y super plastificante como aditivo para suplir el efecto de reducción de trabajabilidad causado por la adición de las fibras. Es menester resaltar que, los aditivos y las fibras se agregaron a la mezcla en estado fresco. Para esta investigación se realizaron 36 probetas cilíndricas y 12 paneles cuadrados, y fueron sometidos a ensayo de compresión y absorción de energía respectivamente. Los resultados no fueron satisfactorios, debido a que la resistencia a la compresión disminuyó considerablemente con la adición del polímero ETONIS 850 y además, la energía absorbida no presentó una diferencia significativa respecto al concreto testigo.

Por otra parte, Mendivil, Gómez, Castro, Corral, Arredondo y Almaral (2015) estudiaron la influencia de la resina polimérica en un concreto reciclado modificado con polímero bajo el proceso de carbonatación acelerada. En esta investigación se utilizó 9%, 13% y 17% de resina polimérica a base de PET como aditivo en un concreto reciclado con 25% de AGR-C. Los resultados de este estudio fueron positivos, debido que al adicionar la resina en el concreto se sellan los canales de poros, logrando así, disminuir la cantidad de CO₂ que puede ingresar al concreto.

Ion et. al (2013), presentan la influencia de tres tipos de polímeros en las propiedades del concreto en estado fresco y estado endurecido (poliuretano, metilcelulosa y la resina

epóxica), que agregaron en las mezclas de concreto fresco convencional en diferentes proporciones y manejando una relación de agua/cemento de 0.4. Los resultados de la resistencia a la compresión y flexión, obtenidos a los 28 días del concreto con adición del 10% de resina epóxica fue de 77.4 MPa y 22.45 MPa respectivamente, sin embargo no se presentan buenos resultados con el uso de metilcelulosa y poliuretano. De este modo concluyen que la resina epóxica es un excelente aditivo para mejorar las propiedades mecánicas del concreto.

Carrión y colaboradores (2014), elaboraron muestras de concreto polimérico, las cuales estaban compuestas con resina de poliéster insaturado ortoftálico, agregados reciclados de durmientes de concreto y micro-rellenos artificiales, en esta, variaron las cantidades de resina, la naturaleza de los agregados y la distribución del tamaño de partículas de los micro-rellenos para determinar la influencia de estos componentes en las propiedades físico-mecánicas del concreto polimérico. Los resultados mostraron que, aunque el agregado basáltico reciclado (RBA) tenía mayor absorción de agua, logró una mejora en las propiedades mecánicas del concreto polimérico que el agregado de caliza reciclada, además, se observó que la resina de poliéster y la distribución del tamaño de partículas de los micro-rellenos, mejoraron el comportamiento mecánico del concreto polimérico reciclado al aumentar la cantidad y optimizar respectivamente dichos componentes.

1.1.2.2 A nivel nacional

A nivel nacional, S. Giraldo (2015), plantea la realización de un diseño de mezcla de concreto polimérico óptimo en cuanto al comportamiento mecánico y su desempeño en elementos estructurales, reemplazando cargas cerámicas convencionales por cargas cerámicas recicladas de los RCD. Para ello fue necesario el análisis de los antecedentes de concreto polimérico enfocándose en 4 investigaciones, en donde se mostraron los diferentes diseños de mezclas que contempla cada investigación con sus respectivos parámetros, una vez hecho el diseño de mezcla, se sometieron todas las muestras que se realizaron por cada dosificación a respectivos ensayos para determinar las propiedades fisicomecánicas. Los resultados fueron

gratificantes, pues la dosificación número 4 fue la que mejor comportamiento mecánico tuvo, registró un valor de resistencia a la compresión de 63,8 MPa, siendo esta muy alta respecto al tiempo en que se logró dicha resistencia y teniendo en cuenta que el diseño de mezcla se asemejó al de un concreto convencional de 28 MPa; se muestra como conclusión, que este tipo de concreto es eficiente para la industria de la construcción y como elemento estructural, puede ser usado en dados y pedestales de fundación, y columnas que tengan grandes solicitaciones de carga a compresión y cortante. Su alto costo de producción lo compensa su bajo peso y alta resistencia en menos tiempo, reduciendo en gran medida el tiempo de construcción y logrando estructuras de gran altura.

Por su parte, M. Valencia et. al (2010), evalúan la influencia del contenido de resina y la relación masa relleno/masa-resina (M_f/M_r) en las propiedades mecánicas y físicas del CP. En esta investigación se reemplazó el cemento Portland por resina de poliéster tereftálica; se utilizó arena de río y granito, como agregado y escoria de alto horno y el polvo cerámico, como rellenos. Se realizaron diferentes relaciones M_f/M_r que van desde 0 a 1,4 con incrementos de 0,2 para cada uno de los rellenos y se obtuvieron resultados satisfactorios, donde el concreto polimérico con escoria de alto horno y una relación M_f/M_r de 1,4 fue el que mejor comportamiento físico mecánico presentó, concluyendo que los concretos poliméricos con diferentes relaciones M_f/M_r presenta mejores propiedades que el concreto portland convencional, siendo esta mejoría hasta en un 100%.

1.2 Planteamiento del problema

El concreto es considerado un material de construcción por excelencia, este aporta resistencia a las estructuras frente a sus solicitaciones de carga y asimismo brinda durabilidad ante el ambiente al que se exponen, además, es un material económico debido a su composición, siendo el agregado pétreo el componente que más volumen ocupa dentro del concreto, como lo afirma el Instituto del concreto (2000) “Los agregados son el mayor

constituyente del concreto, generalmente componen más del 70 por ciento del material en un metro cúbico de concreto” (p.67); generando una gran demanda de estos agregados.

Los agregados pétreos son extraídos de las canteras naturales y del lecho de los ríos ocasionando serios problemas ambientales, pues interrumpen el curso normal de los ecosistemas allí presentes como también la alteración del paisaje; puesto que es evidente la disminución del nivel freático, el aumento de la presencia de material sólido en suspensión reflejado en la turbidez de los ríos (C. Ramírez et. al, 2009), la perturbación de la superficie y la topografía de las riberas de los ríos, alteración y destrucción de hábitats riparios y acuáticos, aumento de riesgo de inundaciones o avalancha, deterioro de la calidad del aire local, cambio de disponibilidad del agua, entre otros (Ortega, 2017).

Cuando la industria de la construcción aumenta, se producen más residuos tanto de construcción como de demolición de estructuras inestables o inseguras para su uso, por ello hay que tener en cuenta el proceso de disposición de los residuos de construcción y demolición, el cual no se ha tomado con responsabilidad y no se le ha dado la importancia que se debe, pues la falta de sitios adecuados para su alojamiento y la cultura ciudadana conlleva a que estos residuos sean arrojados a zonas verdes y afluentes, provocando un gran impacto ambiental.

Es por esto, que se hace necesario buscar una alternativa para dar solución a estas problemáticas que afectan directamente al medio ambiente y a la población, para ello se plantea el uso de agregado grueso producto de concreto reciclado y la resina de poliéster en la producción de concreto. Aunque su uso puede disminuir la problemática que se está generando, es necesario realizar los estudios pertinentes como densidad, absorción y resistencia a la compresión del concreto obtenido, en comparación con el concreto convencional para garantizar su uso.

Por último, surge la siguiente pregunta problema ¿Qué características físico-mecánicas presenta el concreto con agregado grueso reciclado y resina de poliéster para generar una alternativa ecosostenible en el campo de la construcción?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar la resistencia a la compresión y propiedades físicas de densidad y absorción con resina de poliéster y agregado grueso reciclado de concreto producto de residuos de construcción y demolición (RCD).

1.3.2 Objetivos específicos

- Realizar el diseño de mezcla según el método propuesto por el instituto americano del concreto (ACI) descrito en ACI 211.1, teniendo en cuenta las propiedades de los agregados, tanto natural como del concreto reciclado producto de RCD: granulometría, densidad, masa unitaria, humedad y absorción.
- Determinar la resistencia a la compresión del concreto convencional, concreto reciclado, concreto modificado con polímero y del concreto reciclado modificado con polímero.
- Determinar las propiedades físicas (densidad y absorción del concreto en estado endurecido) del concreto convencional, concreto reciclado, concreto modificado con polímero y del concreto reciclado modificado con polímero.
- Comparar los resultados obtenidos en el estudio de resistencia a la compresión y en los estudios físicos (densidad y absorción del concreto en estado endurecido) entre el concreto convencional, concreto reciclado, concreto modificado con polímero y el concreto reciclado modificado con polímero.

1.4 Justificación

La industria de la construcción es causante de enormes impactos ambientales negativos, una de las razones por la que se afirma esto, se debe a la extracción de materia prima, como es el caso de la arena y la grava, provocando graves daños en la biodiversidad y disminución de los recursos (Enshassi et. al, 2014). Otra razón, es por la afectación de drenajes naturales, contaminación, alteración del paisaje y muchos más, a causa de la mala disposición de escombros y demás desechos que esta genera (360 en concreto, s.f.-c).

En cuanto a la extracción de agregados, la alta demanda de arena y grava para su uso en la construcción genera impactos ambientales negativos cada vez más preocupantes. De acuerdo a Fritts (2019), “A nivel mundial, los seres humanos consumen hasta 50 mil millones de toneladas métricas de arena y grava cada año, lo que equivale 18 kilogramos por persona por día”, además, resalta que la extracción de estos materiales podrá tener un incremento de 82 mil millones de toneladas métricas para el año 2060.

Este aumento en la demanda de agregados se puede evidenciar a nivel nacional según los datos obtenidos por la Agencia Nacional de Minería, donde se exponen las cifras de producción de rocas y materiales para la construcción (arena, grava, asfaltitas, diabasa y recebo) por trimestre. De acuerdo con Jiménez (2017), la producción de estos materiales aumentó 81% del primero al segundo trimestre del año 2017, y comparado con el año anterior en este mismo periodo el aumento en la producción de estos materiales fue significativo con más de un millón de metros cúbicos. Así mismo, para el primer trimestre del año 2020 y 2021 las cifras de producción de rocas y materiales de construcción pasaron de 1.603.634 m³ a 3.043.869 m³. En estos mismos periodos a nivel departamental (Huila), la producción de arena se incrementó de 15.133 m³ a 29.777 m³, y la producción de grava, de 29.055 m³ a 33.223 m³ (Agencia Nacional de Minería, 2020, 2021).

Por otra parte, respecto a la generación de RCD su aumento, mal manejo y disposición conlleva también a alarmantes preocupaciones ambientales. En Colombia, por ejemplo, según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible (2017), en promedio las principales

ciudades del país producen un total de 22'270.338 toneladas de RCD de los cuales se presenta un índice de aprovechamiento muy bajo.

Con respecto a todo lo anterior, este estudio pretende conocer del CMP con sustitución parcial y total de AGN por AGR-C, las propiedades físicas (densidad y absorción del concreto en estado endurecido) y su resistencia a la compresión; y de esta manera, contribuir con la propuesta de un material compuesto como alternativa ecosostenible que reemplace el concreto convencional, logrando así reducir las problemáticas presentadas.

Es necesario resaltar, que el remplazo del AGN por AGR-C provoca algunas variaciones en el CR respecto a las propiedades del concreto convencional, como lo son la disminución de la densidad, incremento en la absorción y la porosidad, y reducción de la resistencia a la compresión (Varela, 2012), por lo tanto, se adiciona resina de poliéster de uso comercial para lograr suplir dichas falencias, puesto que se ha evidenciado grandes mejoras en las propiedades físico mecánicas del concreto convencional con el uso de polímeros (Aguado y Salla, 1987, Mahdi et. al, 2010, Ohama, 1998).

1.5 Estructura del documento

La estructura del documento sigue el siguiente orden:

- En el primer capítulo se presenta la Introducción del proyecto, en ella se recoge la información necesaria para conocer a fondo la problemática y algunas alternativas que se han propuesto a través del tiempo, motivando así la realización del presente proyecto. Además, expone brevemente la metodología para cumplir los objetivos descritos.
- El segundo capítulo aborda el marco teórico, en el cual, se reúne información y conceptos fundamentales para lograr poner en contexto al lector, y con ello ofrecerle una buena comprensión y análisis del proyecto.

- El tercer capítulo expone la metodología que se lleva a cabo para la realización del presente proyecto, en donde se analizan y describen los diferentes ensayos normatizados para la obtención de las características y propiedades de los materiales utilizados (arena, AGN, AGR-C) y de los concretos estudiados en estado fresco y endurecido, dando prioridad a las propiedades objeto de estudio (densidad, absorción y resistencia a la compresión).
- El cuarto capítulo recoge los resultados de los ensayos del capítulo anterior y el análisis respectivo, se evalúa la influencia de sustituir el AGN por AGR-C y de adicionar resina de poliéster en las propiedades físicas (densidad y absorción) y resistencia a la compresión, de los diferentes concretos producidos.
- El quinto capítulo incluye las conclusiones que resulta del análisis de la información consultada, de la experimentación realizada y de los resultados expuestos en los capítulos anteriores. Además, se incluyen recomendaciones en donde se especifican los aspectos a mejorar o adicionar en futuras investigaciones relacionadas.

Capítulo 2

2. Marco teórico

2.1 Concreto

2.1.1 Definición

El concreto es una mezcla heterogénea compuesta por cemento como material aglutinante, agua, agregado grueso y agregado fino, en algunos casos se utilizan aditivos para modificar y mejorar algunas de sus propiedades. Es un material de construcción creado por el hombre muy similar a una roca, diseñada y producida bajo diferentes normativas para su uso y aplicación en la construcción de diferentes tipos de estructuras.

Este, es considerado como un material de construcción por excelencia, gracias a su duración, resistencia, impermeabilidad, facilidad de producción y economía (Gutiérrez, 2003).

2.1.2 Propiedades del concreto

El concreto adquiere diferentes propiedades en sus procesos de cambio; las propiedades que se adquieren en su estado fresco deben permitir una buena trabajabilidad, un adecuado transporte y facilitar su colocación, por otra parte, en estado endurecido se obtienen propiedades mecánicas las cuales hacen que las estructuras sean resistentes y durables (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010).

2.1.2.1 Propiedades en estado fresco

Según Neville y Brooks (2010), el grado de compactación del concreto es de gran importancia, pues este puede afectar la durabilidad, estabilidad de volumen y su resistencia. Siendo necesario que durante el proceso de la mezcla el concreto adquiera propiedades que permitan una excelente compactación, entre las que destacan una buena trabajabilidad y también que se pueda transportar, colocar y acabar con la suficiente facilidad, sin segregación.

2.1.2.1.1 Trabajabilidad

Se define como la capacidad que adquiere el concreto en estado fresco para ser colocado, consolidado y acabado, evitando la segregación o separación de sus ingredientes durante su transporte y manejo (Instituto del Concreto, 2000). Existen diferentes factores que influyen en la trabajabilidad del concreto, entre los cuales se tienen: el método y la duración de transporte, características y cantidad de los materiales cementantes, consistencia del concreto, características de los agregados, aire incluido, cantidad de agua, temperatura del aire y aditivos (Kosmatka et. al, 2004).

2.1.2.1.2 Consistencia

La consistencia hace referencia al estado de fluidez del concreto, es decir que tan dura (seca) o blanda (fluida) es una mezcla de concreto en su estado plástico (D. Sánchez , 2001). Es considerada una buena indicación de trabajabilidad, se puede medir realizando el ensayo de revenimiento o del cono de Abrams descrito en la NTC 396. Un concreto de bajo revenimiento tiene una consistencia rígida o seca, si la mezcla es muy seca va a ser de difícil manejo y compactación, además, los agregados gruesos tienden a separarse. Esto no indica que una mezcla fluida sea la mejor, pues esta puede presentar problemas de segregación y formación de espacios vacíos, lo ideal sería que la mezcla fuese lo más seca posible que permitiese su manejo y colocación (Kosmatka et. al, 2004).

2.1.2.1.3 Segregación

La segregación hace referencia a la separación de los componentes de una mezcla heterogénea, de modo que su distribución ya no sea uniforme. En el concreto la causa

principal de la segregación es la diferencia de los tamaños de las partículas, pudiéndose controlar mediante la proporción adecuada de los materiales y el cuidado en la manipulación (D. Sánchez, 2001; Neville y Brooks, 2010).

2.1.2.2 Propiedades en estado endurecido

3.2.1.1.1 Resistencia

La resistencia a la compresión (f'_c) es considerada la propiedad mecánica más importante del concreto, pues garantiza su calidad estando directamente relacionada con la pasta de cemento (Neville y Brooks, 2010) y a partir de esta se estudian otras propiedades, como la resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y resistencia al corte entre otras (D. Sánchez, 2001).

Según Kosmatka et al. (2004), “la resistencia a la compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a carga axial de especímenes de concreto a una edad de 28 días.” (p. 8). Dicha resistencia es considerada la ideal para el diseño de estructuras, esta depende de la relación agua material cementane, características del agregado, hidratación, curado, condiciones ambientales y edad del concreto (Niño, 2010).

Varias normativas a nivel mundial han adoptado 28 días de edad para medir la resistencia a la compresión, pues a partir de este tiempo el concreto deja de ganar resistencia considerablemente. La Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010) señala que “a menos que se especifique lo contrario f'_c debe basarse en ensayos a los 28 días. Si el ensayo no es a los 28 días, la edad de ensayo para obtener f'_c debe indicarse en los planos o especificaciones de diseño” (p.C-67).

2.1.2.2.1 Durabilidad

La durabilidad del concreto se define como su habilidad de resistir la acción del ambiente, ataques químicos y abrasión, conservando sus propiedades. De acuerdo con los diferentes tipos de concreto existen diferentes durabilidades, dependiendo del ambiente al cual van a estar expuestos y de las propiedades deseables (Kosmatka et al., 2004).

El concreto puede disminuir su durabilidad si están expuestos a diferentes condiciones ambientales, presentando ataques químicos, físicos y biológicos. En cuanto a los ataques químicos, estos se originan por la presencia de ácidos y sulfatos, y se generan por fenómenos como la reacción alcali-agregado, carbonatación del cemento y corrosión del refuerzo; por otro lado, los ataques físicos son generados por acciones de congelamiento y deshielo, humedecimiento y secado, cambios de temperatura, abrasión y fuego; por último, los ataques biológicos se deben a la presencia de vegetación, microorganismos y descomposición orgánica (Niño, 2010).

2.1.2.2.2 Permeabilidad

Permeabilidad es la capacidad que permite el paso de un fluido a través del concreto, está en función de la permeabilidad de la pasta, la permeabilidad y granulometría de los agregados, la calidad de la pasta y de la zona de transición del agregado, y la proporción relativa de pasta y agregado (Kosmatka et al., 2004).

Para estructuras que van a contener un fluido, en especial si estos son agresivos, se debe disminuir al máximo la permeabilidad del concreto. Así se logra evitar que estos fluidos circulen a través del concreto y que presenten ataques por estos (Niño, 2010).

2.1.2.2.3 Masa volumétrica

La masa volumétrica del concreto está muy relacionada con la cantidad y densidad de los agregados, la cantidad de aire, agua y cemento. Un concreto convencional, tiene una masa volumétrica que varía entre 2000 y 2400 kg/m³ (Kosmatka et al., 2004).

2.2 Concreto Reciclado

2.2.1 Definición

El CR es aquel que se produce con residuos que pasan por un proceso de selección y de tratamiento, buscando eliminar los contaminantes que estos contengan y así, ser utilizados para reemplazar parcial o totalmente los agregados naturales que componen el concreto

tradicional. Estos agregados proceden de diferentes orígenes, en su mayoría son materiales inorgánicos, siendo los residuos de construcción y demolición los más utilizados y los que presentan mejor comportamiento en relación con las propiedades del concreto (C. García, 2012).

Según Fernando López (2008), en la mayoría de los estudios que se han desarrollado respecto a la sustitución del agregado natural por agregado reciclado, los agregados finos reciclados influyen negativamente en las propiedades del concreto, por ello los estudios se han centrado en la sustitución del AGN por AGR-C en diferentes proporciones, logrando hacer comparaciones entre un concreto tradicional y un CR, donde se concluye que el uso de agregados reciclados afecta a las propiedades del concreto.

El empleo del CR permite disminuir el consumo de los agregados naturales producidos y extraídos de canteras o de los ríos, además, ayudan a reducir y dar un mayor control a la disposición de los residuos generados en las obras, plantas de prefabricados, demoliciones y de construcciones (C. García, 2012).

2.2.2 Agregados reciclados de concreto

Dentro de los residuos de construcción y demolición se tienen los residuos de concreto, los cuales proceden de la demolición de diferentes elementos estructurales como vigas, columnas, cimentaciones, pilares, elementos prefabricados, pavimentos etc. También su procedencia puede ser sobrantes de la ejecución de obras (Nieto, 2015).

Según Pérez (2011), las características y propiedades de los agregados reciclados están ligadas a la procedencia y características del concreto original, por lo que es importante tener un conocimiento de estas y así poder evaluar el agregado producto de este material.

De acuerdo con la normativa española EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural (2011), para concreto estructural se limita solo al uso de los agregados gruesos provenientes de los residuos de concreto en un porcentaje de 20% en peso sobre el contenido total del agregado

grueso, también especifica que el tamaño debe estar por encima de los 4 mm. Además, considera que los agregados reciclados provenientes de concretos estructurales sanos o de resistencia elevada son adecuados para la fabricación del concreto reciclado estructural, siempre y cuando se cumplan las especificaciones que dicta dicha norma.

2.2.2.1 Tratamiento del agregado

Al ser los agregados reciclados materiales proveniente de residuos de concreto, es necesario que estos pasen por diferentes procesos de selección y limpieza, con ello se busca evitar posibles agentes que reduzcan las características del concreto a producir. Pues, algunos agregados reciclados de concreto pueden contener materiales tales como acero, plástico, vidrio, madera etc, lo que hace necesario que la obtención de estos agregados pase por diferentes procesos, de acuerdo con Pérez (2011), se tienen los siguientes: demolición selectiva, separación de los contaminantes y retiro de los mismos, ruptura y transporte en fragmentos manejables y transformación.

2.2.2.2 Propiedades y características del AGR-C

El AGR-C disminuye, cambia o pierde algunas de las propiedades que tuvieron anteriormente cuando eran agregados naturales, pues estos han pasado por varios procesos para ser nuevamente utilizados. Es importante conocer las características y propiedades de estos materiales con el fin de ajustarlas y lograr así un concreto que aporte las características deseadas para determinada obra o estructura. Según Laserna (2015), las principales propiedades del AGR-C a tener en cuenta son la densidad, la absorción de agua y la dureza, estas tienen una estrecha relación con el mortero adherido a dicho agregado.

2.2.2.2.1 Granulometría

La granulometría depende principalmente del tipo de trituración para su procesamiento. La que, cuando es por impacto se logran alcanzar reducidos tamaños, y genera mayor cantidad de finos en comparación a la trituradora de cono y las machacadoras de mandíbula (Navarro, 2014).

El AGR-C resultante varía de 70% a 90% del total del agregado producido, dependiendo de la composición del concreto original y el tamaño máximo deseado (Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural (ACHE), 2006).

Obtenidos los AGR-C, estos siguen desprendiendo material fino, generados por la disgregación del agregado al manipularse, oscilando entre el 2% y el 5%. Además, estos presentan una alta cantidad de mortero, el cual influye negativamente a las propiedades del concreto, pues estas hacen que el agregado no tenga una buena adherencia y aumente el agua de amasado de la mezcla (Navarro, 2014).

2.2.2.2.2 Densidad Específica

Los agregados reciclados presentan una menor densidad que los agregados naturales, debido al mortero que están adheridos en ellos y las impurezas como asfalto y ladrillo (M. Sánchez, 2004).

Además, según Pérez (2011), “los factores más influyentes sobre la densidad son: el proceso de producción del agregado, el tamaño de las fracciones obtenidas y su grado de contaminación”.

2.2.2.2.3 Absorción

Según Hernández (2016), es la propiedad física del agregado reciclado que difiere mayormente respecto al agregado natural.

La absorción de los AGR-C es mayor al de los AGN, esto se debe a que el mortero adherido en estos presentan una alta absorción; los AGN tienen una absorción que oscila entre 0% a 5%, en cambio, los AGR-C alcanzan valores entre 0,8% y 13 %, en promedio un valor de 5,6% de acuerdo a diferentes estudios (M. Sánchez, 2004).

2.2.2.2.4 Forma y Textura Superficial

La forma y la textura de los agregados reciclados depende de su proceso de obtención o trituración. En lo que se refiere a la forma, suelen ser angulosa lo que aumenta la relación superficie/volumen, lo que genera una mayor fracción dentro de la estructura del concreto.

En cuanto a la textura, en los agregados reciclados tiende a ser más rugosa y porosa que la de los agregados naturales y, además, su superficie es muy áspera. Los agregados reciclados al tener estas características de rugosidad y forma angular, ayuda a que haya una mayor adherencia con la matriz de cemento (Cubas y Cabrera, 2019).

2.2.2.2.5 Impurezas

Las impurezas y contaminantes más comunes que presentan los agregados reciclados son acero de refuerzo, metales, vidrio, plástico, madera, pintura y papel; los cuales influyen negativamente en las propiedades del CR, por ejemplo, disminuye su resistencia mecánica (B. Hernández, 2016).

Según Navarro (2014), las impurezas presentes en los agregados reciclados pueden ocasionar otros perjuicios como se enlistan a continuación:

- Los residuos de ladrillo provocan una disminución a la resistencia a ciclos de hielo y deshielo, además, pueden originar fenómenos expansivos.
- El vidrio favorece la reacción álcali-agregado, y este tiende a ser difícil de separar, pues su densidad es similar a la del agregado.
- La madera y el papel presentan inestabilidad a los ciclos de humedad-secado y de congelación-deshielo, provocando que se generen desconchados superficiales en la superficie del concreto.
- Los restos arcillosos pueden provocar retracciones en el concreto.
- La presencia de yeso puede ocasionar un ataque por sulfatos.
- Los metales pueden provocar manchas por la oxidación del acero.

2.2.2.2.6 Contenido de Mortero adherido

Como se ha mencionado anteriormente, el mortero adherido en los agregados reciclados influye notablemente en las propiedades del CR, pues provoca que los agregados reciclados tengan una menor densidad, mayor absorción de agua, menor resistencia, menor dureza y resistencia a la fragmentación (Navarro, 2014). Por consiguiente, es necesario determinar la cantidad de estos en los agregados.

Aunque no se tenga una normativa para determinar el contenido de mortero adherido, en diferentes estudios estas cantidades se han determinado por medio de varios procesos, como por ejemplo desprender este material del agregado original y sacar la diferencia de pesos con y sin este, para dar un porcentaje en peso de este. De acuerdo con algunos estudios, este valor oscila entre 26% a 60% (M. Sánchez, 2004).

2.2.3 Propiedades del concreto reciclado en estado fresco

2.2.3.1 Consistencia

El concreto con agregados reciclados presenta una mayor consistencia cuando se mantiene la misma relación agua/cemento, respecto a un concreto convencional. Además, cuando se tienen un concreto con mayor cantidad de agregados reciclados, se debe considerar importante la cantidad de agua de amasado, pues los agregados reciclados presentan una alta absorción debido a su forma y textura, proceso de trituración y el cambio de granulometría durante el proceso de amasado, disminuyendo así la relación agua/cemento y por ende un aumento en su consistencia. Además, existen diferentes modos para obtener la consistencia deseada, tales como estimar la cantidad de agua adicional mediante ensayos previos, saturar el AGR-C antes del proceso de amasado o utilizar un aditivo superplastificante (Navarro, 2014).

2.2.3.2 Trabajabilidad

La trabajabilidad disminuye al usar agregados reciclados pues su mayor absorción hace que se obtenga una mezcla seca y menos trabajable. Esta se ve también afectada por el proceso de triturado de los agregados, cuya forma obtenida es angular, haciendo que se presente mayor fricción interna y por ende mayor utilización de cemento para obtener una trabajabilidad igual a la del concreto convencional. Además, la trabajabilidad disminuye cuando es mayor la cantidad de AGR-C en la mezcla (Cubas y Cabrera, 2019).

2.2.3.3 Densidad

Debido al mortero que se adhiere en el AGR-C, la densidad del CR en estado fresco es menor en comparación al concreto convencional. Los valores de la densidad oscilan entre 2,13 a 2,40 kg/dm³ (Navarro, 2014).

2.2.4 Propiedades del concreto reciclado en estado endurecido

Como se ha visto anteriormente, el uso de agregados reciclados en el concreto puede influir o no a las propiedades del CR endurecido, dependiendo de su origen, contenido, gradación, propiedades físicas y características (Safiuddin et. al, 2013).

2.2.4.1 Resistencia a la compresión

Según Laserna (2015), el uso de agregados reciclados en el concreto disminuye la resistencia a la compresión, manteniendo la relación agua/cemento constante; se presenta una disminución de f'_c cuando se aumenta la cantidad de agregado reciclado en el concreto.

Para Navarro (2014) esta propiedad se ve influenciada por diferentes causas, tales como la adherencia de mortero en los agregados, lo que hace que estos tengan una menor resistencia mecánica en comparación al agregado natural, el aumento de zonas debiles en la masa de concreto, pues existe una debil superficie de contacto entre los agregados naturales y el mortero adherido, así mismo se presenta entre los aridos reciclados y el mortero nuevo.

Por otro lado, la calidad del concreto origen de los agregados reciclados, tiene una alta relación con la resistencia a la compresión, pues si el concreto origen es de mala calidad (resistencia a la compresión baja), esta es similar tanto para el concreto testigo (concreto convencional) y el CR para valores altos de la relación agua/cemento (a/c), pero si por el contrario la relación a/c es baja, la resistencia del concreto testigo aumenta paulatinamente, mientras que la del CR llega a un determinado límite, probablemente un valor menor de la resistencia. En cuanto a si se utilizan agregados cuyo concreto origen es de alta calidad (resistencia a la compresión alta), en este caso tanto para el concreto testigo y el CR la resistencia a la compresión aumenta a medida que disminuye la relación a/c, presentando

inclusive valores más altos en el CR respecto al concreto testigo para cualquier valor de a/c (González, 2002).

Además, al hablar de la influencia del porcentaje de los agregados reciclados en la resistencia del concreto, se puede decir que es muy notable, como se verá a continuación en la Tabla 2-1, donde se recopilamos los datos obtenidos por diferentes autores, utilizando diferentes sustituciones en porcentajes de AGR-C.

Investigadores	Relación Agua/Cemento	Porcentaje de adición de AGR	Resistencia a la compresión (MPa)
Fernando López (2008)	0,6	0%	45,1
		20%	47,1
		50%	45,5
		100%	52,4
Malešev et al. (2010)	0,514	0%	43,44
		50%	45,22
		100%	45,66
Varela (2012)	0,65	0%	38,1
		20%	35,0
		50%	33,4
		100%	31,2
Tuyan et al. (2014)	0,43	0%	52,3
		20%	54,7
		40%	57,2
		60%	51,1
Cáceres y V. Valencia (2018)	0,7	0%	32,4
		25%	30,8
		50%	28,8
		100%	26,3
Diosa (2020)	0,37	0%	66,7
		10%	64,3
		20%	66,6
		40%	94,7
Martínez (2021)	0,47	0%	46,36
		20%	55,58
		50%	54,70
		100%	44,04

Tabla 2-1: Resistencia a la compresión del concreto reciclado en función del agregado grueso reciclado

2.2.4.2 Durabilidad

Como es de esperarse, el uso de los agregados reciclados en el concreto implica problemas en la durabilidad de este, pues estos presentan una mayor porosidad y permeabilidad, haciendo que el concreto este expuesto a diferentes agentes o sustancias agresivas, debido a que estas pueden transportarse a través de la red de poros del concreto. Por otro lado, el mortero adherido al agregado reciclado, al ser de una naturaleza distinta a la del nuevo concreto, puede conllevar a que se generen reacciones químicas como la carbonatación o la reacción álcali-agregado (Varela, 2012; Navarro, 2014).

Por otro lado, el CR presenta una baja resistencia a la helada respecto al concreto convencional, debido a la mayor absorción que tienen los agregados reciclados, pues cuando el concreto se satura, la cantidad de agua absorbida es mayor a la del concreto control. Como consecuencia habrá un aumento en el deterioro del concreto frente a los ciclos de hielo y deshielo (Navarro, 2014). Por el contrario, cuando los aridos reciclados proceden de un concreto en el que se utilizó un aditivo aireante, se presentan buenos resultados. (M. Sánchez, 2004)

Otro problema que puede afectar la durabilidad del concreto es la carbonatación, la cual depende del mortero nuevo y de los agregados reciclados. Por un lado, la carbonatación se presentara en el agregado reciclado si su permeabilidad es mayor a la del mortero nuevo, mientras que, si la permeabilidad del mortero nuevo es mayor a la del agregado reciclado la carbonatación se presentará en él, puesto que el dióxido de carbono penetrará por el mortero nuevo, ocurriendo una reacción similar a la del concreto convencional (Fernando López, 2008).

Por otra parte, el CR puede presentar reacción alcali-agregado, dicha reacción tiene lugar en presencia de agua, entre los agregados que contienen sílice y los compuestos alcalinos del cemento, provocando expansiones dentro de la estructura del concreto y por ello una disgregación del mismo. Para su control se siguen los mismos procedimiento que para un

concreto convencional, con mayor dificultad cuando los agregados reciclados son de diferente origen. Además, los agregados reciclados pueden ser o no reactivos (Navarro, 2014).

Fernando López (2008) concluye que, el CR al tener una mayor porosidad, absorción y permeabilidad en comparación al concreto convencional, permite que el proceso de carbonatación se propague más rápidamente y se puedan producir ataques por sulfatos y cloruros fácilmente en ambientes propicios.

2.2.5 Normatividad vigente en Colombia para el uso de AGR en el concreto

En Colombia a partir del año 2021 comenzó a regir la Norma Técnica Colombiana (NTC) 6421 (2021) “Agregados gruesos reciclados para uso en el concreto hidráulico” y la NTC 6422 (2021) “Ensayo de clasificación de los componentes de los agregados gruesos reciclados”. La NTC 6421 establece los requerimientos de calidad y orientaciones de uso de los AGR para aplicaciones en concreto estructural y no estructural, la normativa específica que para un concreto estructural de resistencia máxima de 35 MPa se permite el uso máximo del 20% de AGR en base al Anejo 15 del EHE-08 (Instrucción de Hormigón Estructural), además, para concretos no estructurales de resistencia máxima de 21 MPa especifica un uso del 100% de AGR. Por otro lado, la NTC 6422 va orientada a determinar en porcentajes los componentes presentes en el AGR para una respectiva clasificación, basada en la UNE-EN-933-11.

2.3 Polímeros

2.3.1 Definición

En términos generales, los polímeros son macromoléculas que resultan de la combinación de monómeros mediante el proceso de reacción de polimerización y se caracteriza por tener una unidad monomérica (Francisco López, 2004). De acuerdo con Hermida (2011), los polímeros se pueden clasificar según su origen, teniendo así los que son usados sin modificaciones como los polisacáridos, caucho, llamados polímeros naturales, y otros que son producidos por el hombre, llamados polímeros sintéticos.

2.3.2 Características de los polímeros

Este apartado se centra en dar a conocer las características de los polímeros sintéticos los cuales se clasifican en polímeros termoplásticos y termoestables.

Los polímeros termoplásticos son aquellos que a altas temperaturas se pueden fundir o disolver sin sufrir alteraciones químicas permanentes, permitiendo que al enfriarse el polímero se pueda volver a calentar y no afectar su estructura química (Hermida, 2011).

En cuanto a los polímeros termoestables, según Aguado y Salla (1987), estos no permiten disolverse o fundirse sin presentar cambios químicos irreversibles, por lo tanto, para poder hacer uso de este tipo de polímeros, estos se presentan en forma de uno o más componentes que se mezclan in situ para transformar su estructura de forma permanente. Además, Nodehi (2021) indica que los polímeros termoestables como la resina epoxi, de poliéster y de viniléster se originan a base del petróleo por lo que son altamente inflamables y experimentan un cambio plástico bajo presión.

2.4 Resina de poliéster

La resina de poliéster por sus características, propiedades y bajo costo, es utilizada para la producción de materiales compuestos (Ley, 2007). Esta se puede clasificar como saturada e

insaturada; su diferencia radica en que la saturada no tiene dobles enlaces o anillos en su cadena principal proporcionando una menor reticulación entre monómeros. Cuando se habla de resina de poliéster se hace referencia principalmente a la insaturada (Nodehi, 2021).

La resina de poliéster insaturada se acompaña de un disolvente reactivo, normalmente estireno; esta no puede reaccionar y reticularse a temperatura ambiente sin la presencia de otros componentes (iniciador más catalizador), por lo tanto, la cantidad de estos y la temperatura son los factores principales para generar dicha reticulación (Aguado y Salla, 1987). Este polímero presenta buena resistencia química, estabilidad térmica y dimensional (Ley, 2007; Ramis, 1994) y es normalmente utilizada en materiales compuestos como los concretos con polímeros, donde de acuerdo cómo se emplee, se generan excelentes características mecánicas superiores a las logradas en el concreto convencional de cemento Portland, como la resistencia a la compresión y flexión, adherencia, menores tiempos de curado, resistencia a ambiente agresivos, entre otros (Aguado y Salla, 1987).

2.4.1 Iniciador y catalizador

En general, los polímeros termoestables para su proceso de curado necesitan de un agente iniciador y un acelerante. Por un lado, el iniciador permite comenzar el proceso de reticulación, al producir radicales libres por descomposición (Aguado y Salla, 1987). El iniciador puede cambiar la viscosidad de la resina original, así como sus propiedades mecánicas, durabilidad, tiempo de fraguado, tasa de crecimiento de la resistencia, coeficiente de expansión térmica, contracción y la compatibilidad con otros materiales, por lo que es necesario elegir el agente de curado o iniciador adecuado (Nodehi, 2021). Los iniciadores de mayor aplicación son los peróxidos orgánicos, sales y aminas terciarias (Ramis, 1994). Como iniciador en la resina, los más comúnmente utilizados son el peróxido de benzoilo y el peróxido de metil etil cetona (Aguado y Salla 1987).

Por otro lado, cuando el proceso de reticulación sucede a temperatura ambiente es necesario junto al iniciador otro agente denominado catalizador, cuya función principal es la

descomposición de este inclusive a temperaturas muy bajas. Dentro del grupo de acelerantes se encuentran las sales de cobalto como octoato de cobalto o naftenato de cobalto, y aminas terciarias como N,N-dimetilanilina, N,N-dimetil-p-toluidina, entre otras (Remis, 1994).

2.4.2 Monómero de estireno

El estireno es un monómero insaturado que permiten la formación de los poliésteres mediante su entrelazamiento. Este hace parte de la composición de la resina de poliéster, pues garantiza su curado satisfactorio, debido a que, en el proceso de curado de dicha resina una pequeña cantidad de polímeros de poliestireno se pierde por evaporación, por lo que se justifica utilizar un ligero exceso de este monómero sin exceder el 40% dentro de la composición de la resina (Ley, 2007).

2.5 Concreto con polímeros

Los concretos convencionales se han venido mejorando con diferentes materiales durante toda la historia, esto con el objetivo de suplir cada una de las limitaciones que imponen las condiciones en las que se ejecutan los proyectos de construcción, siendo los polímeros parte de dichos materiales que han logrado excelentes resultados en las propiedades mecánicas del concreto y mejora en la durabilidad, estos han sido utilizados en el concreto desde ya hace varios años, logrando ser el material de construcción dominante en Japón y Estados Unidos durante la década de 1970 y 1980 respectivamente (Ohama, 2011).

El concreto con polímeros se compone de diferentes materiales, que al ser combinados proporcionan un mejoramiento de las propiedades que cada uno de estos componentes desarrolla individualmente, clasificándolo dentro de los materiales compuestos o composites (Aguado y Salla, 1987). De acuerdo con la forma y tiempo en el que se agrega el polímero al concreto permite obtener tres materiales compuestos diferentes, de tal manera que, si se reemplaza por completo el cemento del concreto convencional por polímero y se deja a un lado el agua, se obtendrá un concreto polimérico (CP), mientras que, al agregar dicho

polímero en el momento en que se mezclan los componentes del concreto convencional de cemento Portland, se tendrá como resultado un concreto modificado con polímero (CMP); finalmente, cuando se adiciona el polímero al concreto convencional una vez endurecido, se genera el concreto impregnado con polímero (CIP) (Li, 2011; Neville y Brooks, 2010; J. Ramírez, 1998; Shokrieh et. al, 2017).

Los polímeros utilizados en cada uno de los concretos mencionados anteriormente pueden variar, siendo el latex, la resina epoxi y la resina de poliéster insaturada los más representativos (Aguado y Salla, 1987), de estas, la resina de poliéster comunmente tiene un costo más bajo permitiendole así una mayor aplicación (Gorninski et. al, 2007). En cuanto al costo de producción de estos concretos, el CMP es el más económico, debido a que la cantidad del polímero utilizado es menor (Nodehi, 2021).

2.5.1 Concreto modificado con polímero (CMP)

2.5.1.1 Definición

En términos generales, el CMP es el resultado de añadir un polímero de tipo termoplástico o termoestable, ya sea látex, resinas liquidas o monómeros, al concreto convencional en la etapa de mezclado, logrando así un material híbrido orgánico-inorgánico (Aguado y Salla, 1987; Ohama, 1998; Rodríguez, 2014).

2.5.1.2 Características

De acuerdo con el ACI 548.3R (2003), en el proceso de producción de CMP mientras el cemento experimenta el proceso de hidratación, el polímero se agrupa en los vacíos permitiendo que propiedades como la adherencia, permeabilidad, durabilidad y ciertas propiedades mecánicas se optimicen. Sin embargo, según Aguado y Salla (1987) afirma, que, en cuanto a la tipología macroestructural, este material compuesto presenta vacíos unidos entre sí, generando una red de canales que podrían permitir el contacto del concreto convencional con el exterior.

Los CMP mejoran la resistencia a la compresión como se ha indicado en diferentes estudios en porcentajes de un 15% y un 20% como consecuencia de la unión entre la matriz cementante y el polímero (Mahdi et. al, 2010), además, estos concretos presentan una mejor durabilidad contra el ataque ácido y los ambientes corrosivos comparado con el concreto convencional (Shaker et. al, 1997).

2.5.1.3 Aplicaciones y limitaciones

Los CMP tiene una variedad de aplicaciones gracias a su buen comportamiento mecánico y excelente resistencia a ambientes agresivos, siendo utilizado en recubrimientos de suelos industriales, de pavimentos en garajes, de tableros de puentes, en producción de elementos prefabricados y reparaciones (Aguado y Salla, 1987). Sin embargo, la limitación principal que resulta al utilizar los CMP es su elevado costo, pues el costo de los polímeros es relativamente alto, de esta manera se recomienda su uso cuando el concreto convencional es ineficiente en cuanto a la durabilidad. (Fowler, 1999)

Capítulo 3

3. Metodología

La Tabla 3-1, presenta los procesos que se llevaron a cabo para alcanzar los objetivos.

Metodología				
Etapa I	Etapa II	Etapa III	Etapa IV	Etapa V
Adquirir los materiales (Agregados naturales, agregado reciclado, cemento, resina de poliéster y catalizador)	Caracterizar los agregados *Análisis granulométrico por tamizado (NTC 77, 2018). *Humedad (NTC 1776, 2019) *Densidad y absorción (NTC 176 , 2019 - NTC 237, 2020). *Masa unitaria (NTC 92, 2019). *Material que pasa el tamiz No 200 (NTC 78,2019).	Elaboración de mezclas *Diseño de mezcla ACI 211.1-91 (2009). *Elaboración y curado de especímenes de concreto (NTC 1377, 2010).	Determinar las propiedades del concreto *Asentamiento (NTC 396, 2018). *Resistencia a la compresión (NTC 673, 2010). *Densidad y absorción del concreto endurecido (NTC 5653, 2008)	Análisis de resultados

Tabla 3-1: Metodología

3.1 Diseño de la investigación

La presente investigación tiene un alcance explicativo. Según Hernández et. al (2006), los estudios explicativos “como su nombre lo indica su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, o por qué se relacionan dos o más variables” (p.108). Además, es una investigación de tipo cuasiexperimental, pues se

“manipulan deliberadamente, al menos, una variable independiente para observar su efecto y relación con una o más variables dependientes” (Hernández et. al, 2006, p. 203).

3.2 Hipótesis de investigación

Para el desarrollo del presente proyecto de grado se plantea la siguiente hipótesis de investigación (Hi): El reemplazo de AGN por AGR-C y adición de resina de poliéster no influye significativamente a la resistencia a la compresión, densidad y absorción del concreto en estado endurecido.

3.3 Identificación de Variables

La Tabla 3-2 presenta la matriz experimental del proyecto, la cual incluye las variables independientes y las variables dependientes.

Tipo de concreto	Variables Independientes						Variables Dependientes			
	Relación a/c	Asentamiento (mm)	Tiempo (Días)			% AGR-C	% Resina de poliéster	Resistencia a la compresión	Densidad	Absorción
			7	14	28					
CN	0,457	75	x	x	x	0	0	7, 14, 28 días de curado por inmersión.	28 días de curado por inmersión.	28 días de curado por inmersión.
CR20%	0,457	75	x	x	x	20	0			
CR50%	0,457	75	x	x	x	50	0			
CR100%	0,457	75	x	x	x	100	0			
CMP-1%	0,457	75	x	x	x	0	1			
CMP-3%	0,457	75	x	x	x	0	3			
CRMP20%-1%	0,457	75	x	x	x	20	1			
CRMP20%-3%	0,457	75	x	x	x	20	3			
CRMP50%-1%	0,457	75	x	x	x	50	1			
CRMP50%-3%	0,457	75	x	x	x	50	3			
CRMP100%-1%	0,457	75	x	x	x	100	1			
CRMP100%-3%	0,457	75	x	x	x	100	3			

Tabla 3-2: Matriz experimental.

3.4 Procedimiento experimental

3.4.1 Procedencia de los materiales

Los materiales utilizados para la elaboración de los diferentes tipos de concreto analizados en el presente proyecto, proceden de empresas certificadas del país con una gran trayectoria en el campo de la construcción.

3.4.1.1 Agregados naturales

Los agregados naturales (arena y grava) se obtuvieron de la empresa MASSEQ (Materiales, Suministros, Servicios y Equipos) proyectos e ingeniería S.A.S, ubicada en el km 5 vía Tesalia-Neiva, quienes extraen materiales de cantera y aluviales, siendo el material utilizado de origen aluvial procedente del río Páez. La Figura 3-1 muestra la ubicación de la planta de trituración.

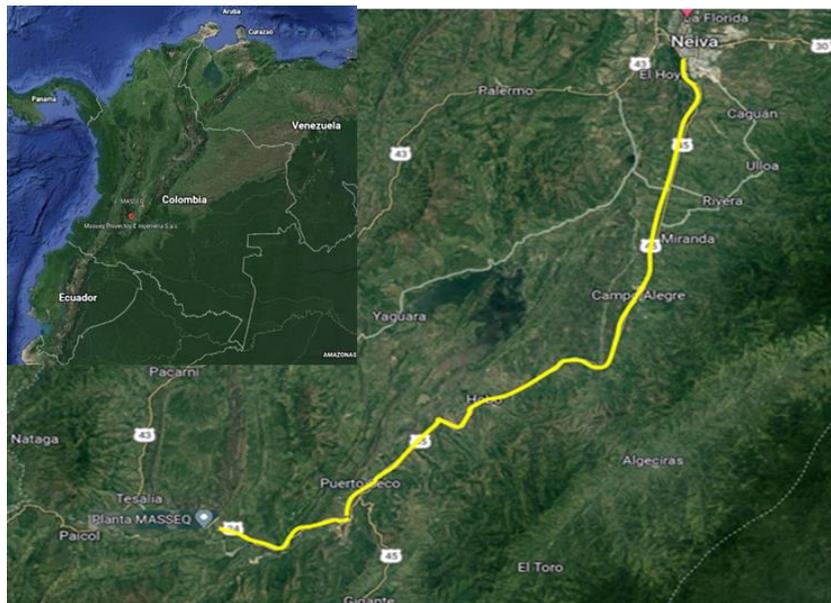


Figura 3-1: Ubicación de la planta tritadora MASSEQ.

Nota. Adaptado de [MASSEQ, Tesalia, Huila], de Google, s.f.-a, (<https://earth.google.com/web/search/MASSEQ,+Tesalia,+Huila>) (Google, s.f.-a)

3.4.1.2 Agregado grueso reciclado de concreto

El agregado grueso reciclado se obtuvo de la empresa Reciclados Industriales ubicada en el km 1,5 costado sur vía Bogotá- Siberia en Cota Cundinamarca. La empresa se dedica al aprovechamiento de residuos de construcción y demolición y produce materiales para diferentes usos, como por ejemplo el agregado grueso para concreto. La ubicación de la planta de trituración se puede apreciar en la Figura 3-2.

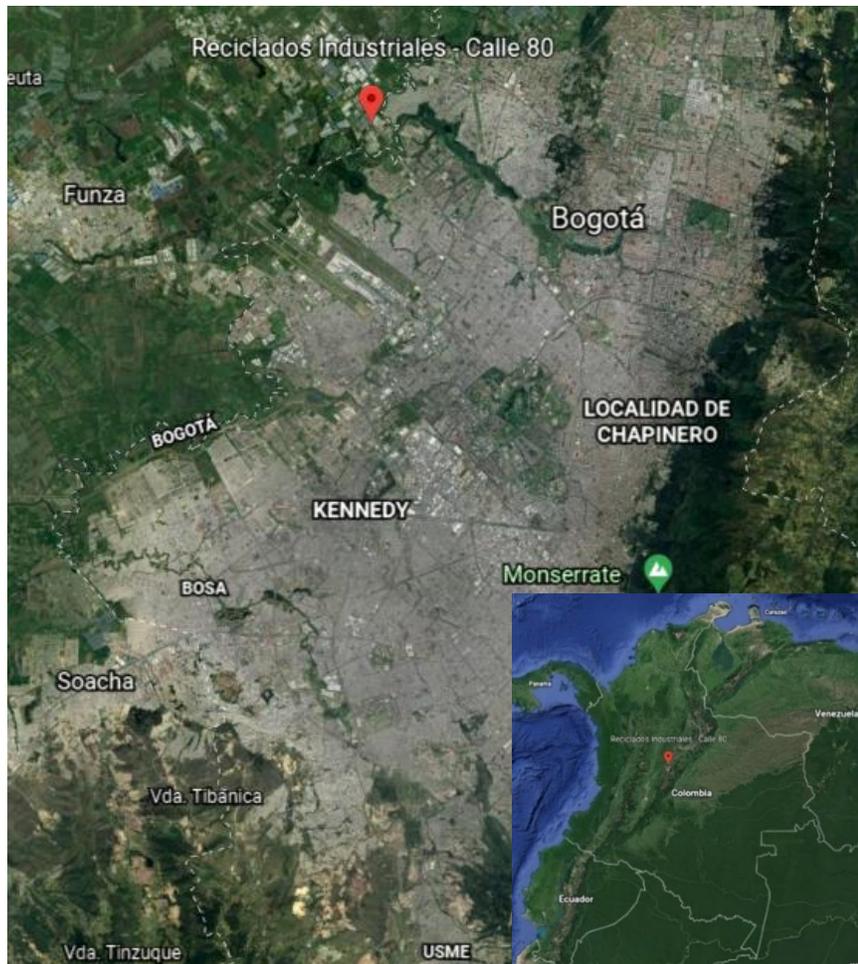


Figura 3-2: Ubicación de la planta de trituración Reciclados Industriales.

Nota. Adaptado de [Reciclados Industriales-Calle 80, Cota, Cundinamarca], de Google, s.f.-b, (<https://earth.google.com/web/search/Reciclados+Industriales++Calle+80,+Cota,+Cundinamarca>)

3.4.1.3 Cemento

El cemento utilizado para la elaboración de los diferentes tipos de concreto fue cemento Argos de uso general. Siendo Argos una organización multinacional con una gran trayectoria en la producción de cementos y concretos en países como Colombia, Panamá, Honduras, Estados Unidos y otros países en el continente, logrando una alta confiabilidad en sus productos y servicios.

3.4.1.4 Resina de poliéster (RP-055T)

La resina de poliéster utilizada es comercializada por la empresa Químicos soluciones industriales S.A.S quienes se dedican a la venta de materias primas, químicos, empaques, aromas e insumos para la industria de aseo, alimentos, plásticos reforzados, tratamientos de agua y construcción.

3.5 Caracterización de los agregados

En la producción de concreto es de suma importancia conocer las características físicas de los materiales que lo componen, dicha caracterización consistió en efectuar diferentes ensayos de laboratorio especificados y reglamentados en diferentes normativas. Los ensayos realizados en esta investigación se regulan bajo la NTC.

3.5.1 Ensayo granulométrico

Para este ensayo se siguió lo establecido en la NTC 77 (2018), allí se describe el procedimiento que se ha de llevar a cabo para la determinación de la distribución de los tamaños de las partículas por medio de un juego de tamices estandarizados. Los valores obtenidos por este ensayo tales como el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso y el módulo de finura (MF) agregado fino fueron necesarios para el diseño de mezclas de concreto. En la Figura 3-3 se aprecia el equipo utilizado para la realización de este ensayo. Para más detalles en el Anexo A (Tabla A-1, Tabla A-2, Tabla A-3) se pueden apreciar los resultados, además, se observa que los agregados cumplen con los límites establecidos por la NTC 174 (2018).



Figura 3-3: Tamizadora.

3.5.2 Ensayo para determinar la humedad

Este ensayo determina la cantidad porcentual de humedad evaporable en los agregados pétreos y su procedimiento se describe en la NTC 1776 (2019). Los valores obtenidos en este ensayo fueron de suma importancia para el diseño de mezcla, pues estos determinaron la dosificación de los agregados y la cantidad de agua de mezclado final. Ver Anexo A (Tabla A-4, Tabla A-5, Tabla A-6).

La Figura 3-4 muestra el proceso de secado de los materiales en el horno, siguiendo las recomendaciones de la norma mencionada anteriormente.



Figura 3-4: Secado del material en el horno.

3.5.3 Ensayo para determinar la densidad relativa y la absorción

La densidad relativa y la absorción son propiedades físicas de los agregados y se obtuvieron siguiendo la NTC 176 (2019) y la NTC 237 (2020) para agregado grueso y agregado fino respectivamente. Los resultados de este ensayo fueron cruciales para la determinación del volumen de los agregados y la cantidad de agua final en el diseño de mezcla de concreto. En el Anexo A (Tabla A-7, Tabla A-8, Tabla A-9) se presentan los resultados de este ensayo.

La Figura 3-5 muestra el proceso que se llevó a cabo para determinar la masa aparente en el agua del agregado grueso en estado saturado superficialmente seco. Por otro lado, en la Figura 3-6 se puede apreciar la arena en condición de superficie seca y el equipo utilizado para determinar la humedad superficial del agregado fino.



Figura 3-5: Montaje para determinar masa aparente en agua.



Figura 3-6: Molde y pisón para ensayo de humedad superficial.

3.5.4 Ensayo para determinar la masa unitaria y vacíos en los agregados

La masa unitaria compactada y suelta se puede determinar mediante los parámetros establecidos por la NTC 92 (2019), a su vez, esta permite hallar los vacíos entre las partículas de los agregados. Esta norma es aplicable en agregados que no excedan los 125

mm de tamaño máximo nominal. Los resultados obtenidos en este ensayo pueden ser consultados en el Anexo A (Tabla A-10, Tabla A-11) y los equipos utilizados para este ensayo se pueden ver en la Figura 3-7.

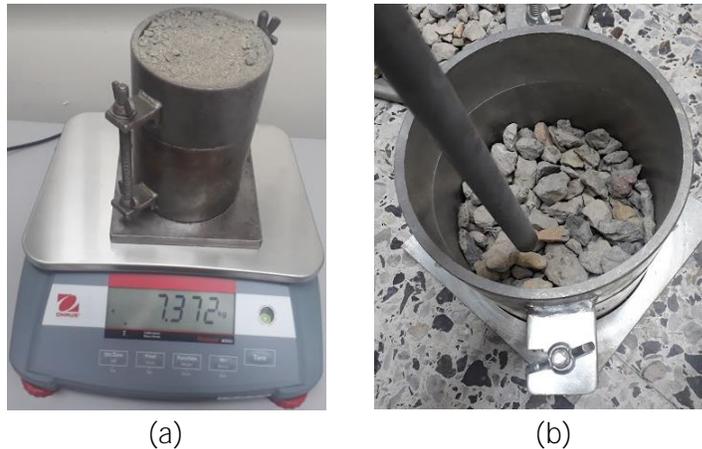


Figura 3-7: (a) Peso de la muestra de arena después de apisonada. (b) Apisonamiento del agregado grueso.

Cabe anotar que la masa unitaria compactada (MUC) es una propiedad necesaria para el cálculo del volumen de los agregados en el diseño de mezcla por el método del American Concrete Institute ACI 211.1-91 (2009).

3.5.5 Ensayo para determinar por lavado el material que pasa el tamiz No 200

Comúnmente los agregados pétreos son comercializados sin un proceso de lavado, siendo esto un motivo para determinar la cantidad de materiales muy finos, tales como arcillas y limos, ya que la presencia de estas partículas puede influir directamente en la calidad del concreto de manera negativa (360 en concreto, s.f.-b). Este ensayo se hizo siguiendo lo establecido en la NTC 78 (2019). Ver Anexo A (Tabla A-12, Tabla A-13, Tabla A-14).

En la Figura 3-8 se muestra el proceso de lavado del agregado fino y agregado grueso.



Figura 3-8: (a) Proceso de lavado del agregado fino. (b) Proceso de lavado del agregado grueso.

3.5.6 Porcentaje de materiales no correspondientes al AGR-C

Para lograr un buen desempeño del concreto es de suma importancia que los agregados utilizados en este se encuentren libres de impurezas y contaminantes. Por ello es necesario conocer la procedencia del material y realizar los debidos procesos de limpieza.

El AGR-C puede presentar materiales no favorables para el concreto, como, por ejemplo: metales, madera, plástico, vidrio y yeso, los cuales deben ser removidos durante su producción. Sin embargo, el AGR-C adquirido para el presente proyecto de grado no se encontraba en condiciones óptimas para su uso, pues aún contenían estos materiales contaminantes. Por este motivo, fue necesario realizar una limpieza de todo este material, logrando retirar gran parte de estos, como se observa en la Figura 3-9.



Figura 3-9: Materiales retirados del AGR-C.

Además, el AGR-C estaba compuesto en pequeños porcentajes de otros materiales como ladrillo, cerámica y agregados con fibras, los cuales al no ser tan representativos se dejaron como parte del AGR-C, estos se clasificaron de acuerdo con la NTC 6422 (2021), dichos valores pueden ser consultados en el Anexo A (Tabla A-15).

Los resultados de los ensayos mencionados anteriormente se resumen en la Tabla 3-3.

Propiedades físicas	Agregados			Normatividad
	AGN	AGR-C	Arena	
Masa Unitaria Suelta (g/cm ³)	1,449	1,194	1,612	NTC 92
Masa Unitaria Compactada (g/cm ³)	1,574	1,316	1,817	NTC 92
Peso específico (g/cm ³)	2,696	2,087	2,545	NTC 176 – NTC 237
Tamaño Máximo Nominal	3/4"	3/4"	-	NTC 77
Módulo de finura	-	-	3,125	NTC 77
% Absorción	0,694	6,766	2,291	NTC 176 – NTC 237
% Humedad	1,379	4,642	7,5	NTC 1776
Lavado tamiz No 200	0,5	0,233	6,704	NTC 78

Tabla 3-3: Propiedades físicas de los agregados.

3.6 Características de los materiales aglutinantes

3.6.1 Características del cemento

Las especificaciones del cemento Argos de uso general cumplen con los valores expuestos en la NTC 121 (2021), los cuales se presentan en la Tabla 3-4. Cabe aclarar, que la determinación de estos valores en el laboratorio no fue posible por falta de equipos necesarios para la realización de los diferentes ensayos, por ello, el presente proyecto de grado está basado en los valores encontrados en la ficha técnica y en otras investigaciones que utilizaron el mismo tipo de cemento.

Parámetros Físicos		Norma de ensayo	NTC 121. Tipo UG
Finura	Blaine, min. (cm ² /gr)	NTC 33	A
	Retenido tamiz 45 µm (%)	NTC 294	A
Cambio de longitud por autoclave, expansión, máx. (%)		NTC 107	0,8
Tiempo de fraguado, Ensayo de Vicat	No menos de, minutos	NTC 118	45
	No más de, minutos	NTC 118	420
Contenido de aire en volumen de mortero, máx. (%)		NTC 224	12
Expansión de barras de mortero a 14 días, máx.		NTC 4927	0,02
Resistencia mínima a la compresión (MPa)			
3 días		NTC 220	8
7 días		NTC 220	15
28 días		NTC 220	24

Tabla 3-4: Especificaciones técnicas del cemento Argos de uso general.

Nota. Recuperado de *Ficha técnica/versión 8. Cemento gris de uso general*, de Argos., 2019, p.3, (<https://colombia.argos.co/wp-content/uploads/2020/09/FT-CEMENTO-GRIS-USO-GENERAL-2019-2.pdf>)

3.6.2 Características de la resina de poliéster

Las características de la resina de poliéster RP-055T se encuentran especificadas en la Tabla 3-5 según su ficha técnica.

Especificación	Valor	Método de análisis
Apariencia física	Líquido viscoso rosado opaco	I-CC-M-G-030
Índice de acidez	40 – 50	I-CC-M-G-014
% Sólidos	55 – 60 %	I-CC-M-G-015
Viscosidad Brookfield c P (Aguja:2, Velocidad: 20) a 25°C.	300 – 450 c P	I-CC-E-I-017
Tiempo de gel (25°C) *	15-20 minutos	I-CC-M-I-066

Tabla 3-5: Especificaciones de la resina de poliéster RP-055T.

Nota. * Tiempo de gel (RP-055T: 100 gramos, Mek-peróxido: 1,5 gramos), el Mek-peróxido funciona como catalizador dentro de la resina de poliéster. Adaptada de *ficha técnica* (p. 1) por Químicos Soluciones Integrales S.A.S., (2016)

3.7 Diseño de mezclas de concreto

La dosificación adecuada de una mezcla de concreto se puede determinar siguiendo diferentes métodos de diseño, los cuales han sido estudiados para garantizar la obtención de un concreto con las características deseadas según su función y uso, además, de buscar una disminución en su costo.

En este proyecto de grado, el diseño de mezcla de concreto se realizó bajo los parámetros y procedimientos establecidos en el método ACI 211.1-91 (2009), el cual es aplicable para concretos de peso normal y para alcanzar resistencias no mayores a 42 MPa. Este método permite ajustar el diseño de mezcla a las propiedades de los materiales, bajo el criterio de trabajabilidad, resistencia y durabilidad. La dosificación de los materiales bajo este método se basa en resultados de ensayos de laboratorio realizados a estos previamente, en los cuales se obtienen valores importantes para la ejecución del método, tales como el peso específico del cemento, el tamaño máximo nominal del agregado grueso, el módulo de finura del

agregado fino, la masa unitaria compacta del agregado grueso, la densidad aparente, la humedad y la absorción de los agregados.

A continuación, en la Figura 3-10 se muestra el proceso de diseño de mezcla y los criterios a tener en cuenta y en el Anexo B se muestra el diseño para el presente trabajo.

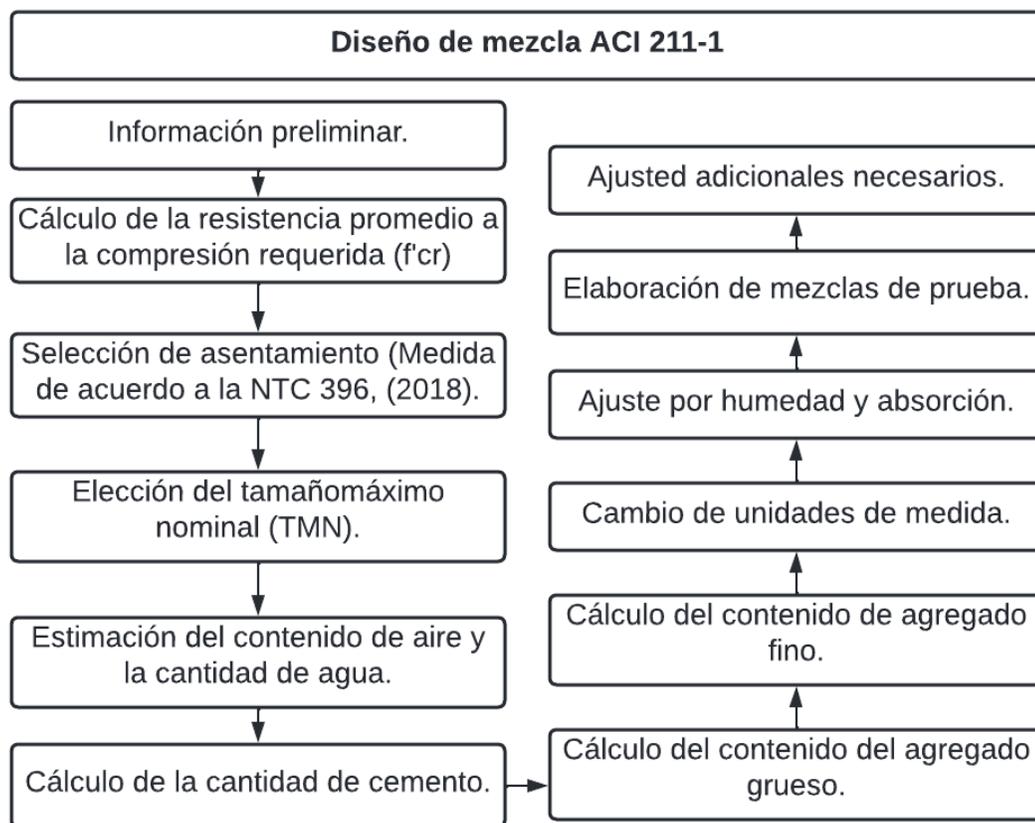


Figura 3-10: Diseño de mezcla método ACI 211.1-91 (2009).

En cuanto a la dosificación de los concretos reciclados, la sustitución en porcentaje del AGN por AGR-C se realizó en volumen y no en masa, debido a la diferencia de sus densidades, siendo la del AGR-C menor a la del AGN (Laserna, 2015). Para este caso se tomó el valor de la masa seca del AGN corregida por asentamiento y se pasó de unidades de masa a unidades de volumen para un metro cúbico de concreto, dividiendo la masa seca del AGN entre la densidad aparente de la misma, y así luego determinar las proporciones en volumen de cada agregado (AGN y AGR-C) según los porcentajes de sustitución especificados,

finalmente, estos valores de volumen se convirtieron en masa seca de los agregados multiplicando cada volumen con la densidad aparente correspondiente a cada agregado.

En el caso de la resina de poliéster, su cantidad se determinó como porcentaje en función de la masa de cemento (ACI 548.1R-97,1997; Mendivil et. al, 2017), sin variar ninguna de las cantidades de los demás componentes del concreto. En este proyecto, para conocer los porcentajes de la resina de poliéster y su catalizador Mek-peróxido, se realizó una ardua investigación, colocando en práctica otros estudios o especificaciones, cuyo objetivo fue conocer el comportamiento en cuanto a trabajabilidad y endurecimiento (ver Anexo C y Figura 3-11).

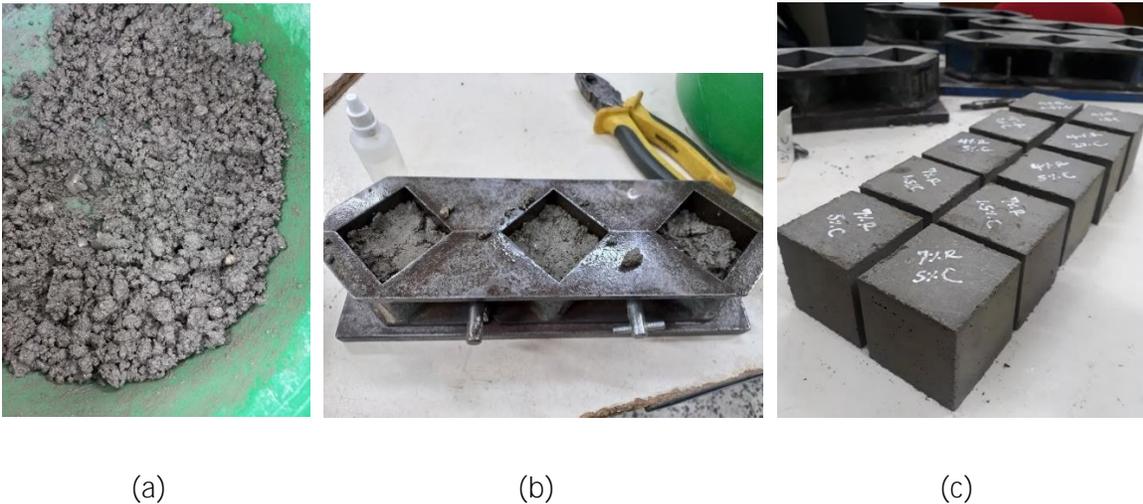


Figura 3-11: (a) Apariencia de mortero con adición de resina de poliéster, (b) Moldeo de cubos de mortero con resina de poliéster, (c) Cubos de mortero con resina de poliéster.

3.8 Clasificación y dosificación de los concretos estudiados

Los concretos producidos en este trabajo tienen como punto de referencia un concreto convencional de 28 MPa (0% agregado grueso reciclado y sin resina de poliéster). Las mezclas de los concretos reciclados correspondientes se componen en porcentajes de sustitución de 20%, 50% y 100% de AGN por AGR-C. Por otra parte, los concretos modificados con polímero (concretos con resina de poliéster) comprende a los mencionados anteriormente con la diferencia que a estos se les adicionó la resina de poliéster en porcentajes de 1% y 3% en relación con la masa de cemento. La denominación de los diferentes tipos de concretos mencionados se muestran en la Tabla 3-6.

Nomenclatura del concreto	% de sustitución de árido reciclado	Proporción de agregados gruesos	% adicional de resina de poliéster
CT	-	100% AGN	-
CR20%	20	80% AGN + 20% AGR-C	-
CR50%	50	50% AGN + 50% AGR-C	-
CR100%	100	100% AGR-C	-
CMP-1%	-	100% AGN	1
CMP-3%	-	100% AGN	3
CRMP20%-1%	20	80% AGN + 20% AGR-C	1
CRMP20%-3%	20	80% AGN + 20% AGR-C	3
CRMP50%-1%	50	50% AGN + 50% AGR-C	1
CRMP50%-3%	50	50% AGN + 50% AGR-C	3
CRMP100%-1%	100	100% AGR-C	1
CRMP100%-3%	100	100% AGR-C	3

Tabla 3-6: Tipos de concretos estudiados.

Nota.

AGN: Agregado grueso natural.

AGR-C: Agregado grueso reciclado de concreto.

CT: Concreto testigo o de referencia.

CR20%: Concreto reciclado con 20% de AGR-C.

CR50%: Concreto reciclado con 50% de AGR-C.

CR100%: Concreto reciclado con 100% de AGR-C.

CMP-1%: Concreto modificado con polímero con 1% de resina de poliéster.

CMP-3%: Concreto modificado con polímero con 3% de resina de poliéster.

CRMP20%-1%: Concreto reciclado modificado con polímero con 20% de AGR-C y 1% de resina de poliéster.

CRMP20%-3%: Concreto reciclado modificado con polímero con 20% de AGR-C y 3% de resina de poliéster.

CRMP50%-1%: Concreto reciclado modificado con polímero con 50% de AGR-C y 1% de resina de poliéster.

CRMP50%-3%: Concreto reciclado modificado con polímero con 50% de AGR-C y 3% de resina de poliéster.

CRMP100%-1%: Concreto reciclado modificado con polímero con 100% de AGR-C y 1% de resina de poliéster.

CRMP100%-3%: Concreto reciclado modificado con polímero con 100% de AGR-C y 3% de resina de poliéster.

La dosificación del concreto testigo y de los concretos reciclados para 1 m³ de concreto, se presenta en la Tabla 3-7, y para los concretos modificados con polímeros se aprecia en la Tabla 3-8. En estas se evidencia que la relación a/c se mantuvo constante en todas las mezclas, de igual forma la cantidad de cemento y agregado fino.

Componentes	Unidad de medida	Tipos de concretos			
		CT	CR20%	CR50%	CR100%
Cemento	kg/m ³	507,28	507,28	507,28	507,28
Agua	kg/m ³	231,83	231,83	231,83	231,83
AGN	kg/m ³	925,31	740,25	462,65	-
AGR-C	kg/m ³	-	143,26	358,15	716,29
Arena	kg/m ³	653,48	653,48	653,48	653,48
Resina de poliéster	% cemento	-	-	-	-
Relación a/c		0,457	0,457	0,457	0,457

Tabla 3-7: Dosificación en masa seca para 1m³ del CT y CR.

Nota. El remplazo de AGN por AGR-C se realizó en volumen y no en masa debido a la diferencia de densidades de cada material (ver Anexo B).

Componentes	Tipos de concretos							
	CMP-1%	CMP-3%	CRMP 20%-1%	CRMP 20%-3%	CRMP 50%-1%	CRMP 50%-3%	CRMP 100%-1%	CRMP 100%-3%
Cemento (kg/m ³)	507,28	507,28	507,28	507,28	507,28	507,28	507,28	507,28
Agua (kg/m ³)	231,83	231,83	231,83	231,83	231,83	231,83	231,83	231,83
AGN (kg/m ³)	925,31	925,31	740,25	740,25	462,65	462,65	-	-
AGR-C (kg/m ³)	-	-	143,26	143,26	358,15	358,15	716,29	716,29
Arena (kg/m ³)	653,48	653,48	653,48	653,48	653,48	653,48	653,48	653,48
Resina de poliéster* (%)	1	3	1	3	1	3	1	3
Relación a/c	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457

Tabla 3-8: Dosificación en masa seca para 1m³ de concretos modificados con polímeros.

Nota. *La resina de poliéster se representa como porcentaje en relación con la masa de cemento.

3.9 Elaboración y curado de muestras de concreto

Se elaboraron 420 especímenes cilíndricos de concreto de 100 mm x 200 mm, de los cuales 360 fueron para obtener resultados a la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado por inmersión, aclarando que para los 12 tipos de concretos se fabricaron 10 probetas por cada día de curado.

Los 60 especímenes restantes se elaboraron para obtener la densidad aparente y la absorción de los diferentes tipos de concreto a los 28 días de curado, aclarando que para cada tipo de concreto correspondieron 5 probetas, de las cuales se obtuvieron 2 muestras para un total de 10 resultados por cada uno.

El procedimiento de preparación de los materiales necesarios para la producción de los diferentes tipos de concreto que se adoptó fue el siguiente:

- El AGN y el AGR-C fueron saturados por inmersión en agua durante 24 horas, para ser utilizados en las mezclas de concreto en condición saturada superficialmente seca (sss), con ello se garantiza mantener la misma relación a/c efectiva, pues la alta absorción de los AGR-C puede provocar un aumento en la consistencia y un pronto endurecimiento del concreto (Fernando López, 2008; Navarro, 2014; M. Sánchez, 2004). La Figura 3-12 representa el AGR-C en condición sss.



Figura 3-12: Agregado grueso reciclado de concreto saturado superficialmente seco.

- Se pesó por separado los agregados, el agua, el cemento, la resina de poliéster y su catalizador como se muestra en la Figura 3-13, con una balanza de 0,1% de exactitud.



(a)



(b)

Figura 3-13: (a) Materiales utilizados para concretos reciclados. (b) Resina de poliéster con catalizador Mek-peróxido.

En cuanto al proceso de mezclado y elaboración y curado de especímenes de concreto se realizó siguiendo los pasos descritos en la NTC 1377 (2010).

La mezcla mediante un proceso mecánico (ver Figura 3-14) se realizó en los siguientes tiempos: 3 minutos de mezclado, 3 minutos de reposo y 2 minutos más de mezclado. Para los concretos modificados con polímero, la resina de poliéster una vez catalizada se adicionó a la mezcla de concreto después del tiempo de reposo y se mezcló durante los 2 minutos adicionales de mezclado para garantizar una incorporación completa en la mezcla.

Inmediatamente después de los 2 últimos minutos de mezclado, se midió la consistencia de acuerdo con la NTC 396 (2018). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 3-9 y el proceso se puede apreciar en la Figura 3-15 y la Figura 3-16.

Tipo de concreto	Asentamiento (cm)
CT	7,5
CR20%	7,5
CR50%	7,5
CR100%	7,0
CMP-1%	7,5
CMP-3%	5,0
CRMP20%-1%	5,5
CRMP20%-3%	5,0
CRMP50%-1%	6,0
CRMP50%-3%	5,0
CRMP100%-1%	5,5
CRMP100%-3%	5,0

Tabla 3-9: Resultado del ensayo de asentamiento de los diferentes tipos de concreto.



Figura 3-14: Proceso de mezclado.



Figura 3-15: Ejecución ensayo de asentamiento.



Figura 3-16: Medición del asentamiento.

Los especímenes de concreto elaborados bajo esta normativa se almacenaron en un lugar fresco y de superficie plana como se ilustra en la Figura 3-17, por su parte el proceso de curado de estas muestras consistió en un curado inicial, en donde se cubrieron los especímenes con un plástico grueso e impermeable para luego pasar a un curado por inmersión.

Cabe resaltar, que los especímenes de concreto con 0% y 1% de adición de resina de poliéster se desmoldaron 24 horas después de su elaboración, luego estos se cubrieron por completo con un plástico (ver Figura 3-18) hasta el momento en que se desencofraron los concretos con 3% de adición de resina de poliéster (48 horas después de su elaboración), pues este porcentaje retardó la etapa inicial de endurecimiento debido al empaquetamiento de las

partículas de cemento no hidratadas por la resina de poliéster (Nodehi, 2021). Finalmente, pasado este tiempo (48 horas) todos los concretos pasaron al curado por inmersión (ver Figura 3-19) hasta los días de la medición de la resistencia, absorción y densidad establecidos.



Figura 3-17: Almacenamiento de los especímenes de concreto.



Figura 3-18: Cilindro de concreto cubierto con plástico.



Figura 3-19: Curado por inmersión de los especímenes de concreto.

3.10 Resistencia a la compresión

La determinación de la resistencia a la compresión se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones de la NTC 673 (2010). “Este ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por la sección transversal de área del espécimen” (NTC 673, 2010, p.2), ver Figura 3-20.



Figura 3-20: (a) Ensayo resistencia a compresión. (b) Especímenes de concreto fallados.

3.11 Densidad y absorción del concreto endurecido

De acuerdo con la NTC 5653 (2008), se determinó la densidad aparente, el porcentaje de absorción y el porcentaje de vacíos (porosidad abierta) del concreto endurecido. Las muestras para su ejecución constaron de rodajas de 100 mm de diámetro y 50 mm de altura, obtenidas por el corte central de cilindros de concreto de 100 mm x 200 mm, la parte inferior y superior han sido descartadas para evitar problemas por homogeneidad. Las muestras estaban libres de grietas, fisuras o bordes rotos observables a simple vista como se ilustra en la Figura 3-21.



(a)



(b)

Figura 3-21: (a) Corte de cilindros de concreto. (b) Muestra de concreto con agregado reciclado.

El procedimiento de este ensayo se puede observar en la Figura 3-22.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3-22: (a) Muestras de concreto secas. (b) Muestras de concreto sumergidas en agua. (c) Muestras de concreto ebullicas. (d) Peso sumergido en agua.

Capítulo 4

4. Análisis de resultados

En este capítulo se exponen los resultados de los diferentes tipos de concretos (Tabla 3-6), referentes a la resistencia a la compresión, la densidad y la absorción del concreto en estado endurecido y su respectivo análisis, en donde se evaluó el efecto del remplazo de AGN por AGR-C y la adición de resina de poliéster.

Para poder analizar los resultados obtenidos de f'_c , se implementó el método Diseño completamente al azar, el cual nos permite identificar si existe o no diferencias significativas entre estos. Este método plantea dos hipótesis, la hipótesis nula (H_0) establece que todas las medias de la población son iguales y la hipótesis alternativa (H_a) establece que al menos una de las medias de la población es diferente. Dichas hipótesis se prueban mediante un análisis de varianza (ANOVA) con un solo factor.

Este análisis estadístico se aplicó a un total de 120 resultados obtenidos de cada uno de los ensayos a la compresión realizados, con un nivel de confianza de 95% y un nivel de significancia $\alpha=0.05$, para poder aceptar o rechazar la hipótesis de investigación planteada (H_i). Todo lo anterior se realizó en el software R, con la interfaz gráfica RStudio (Versión 1.3.1073, © 2009-2020 RStudio, PBC).

Por otro lado, Con respecto a los resultados obtenidos de densidad y absorción del concreto en estado endurecido se realizó un análisis estadístico descriptivo, el cual se basó en la interpretación gráfica.

4.1 Resistencia a la compresión

El análisis de los resultados de esta propiedad se realizó por edad de curado, permitiendo mostrar el comportamiento mecánico por cada tipo de concreto a través del tiempo. La Tabla 4-1 muestra la resistencia promedio a compresión en los diferentes días de curado.

Tipos de concreto	Resistencia a la compresión f'_c MPa		
	Días de curado		
	7	14	28
CT	20,11	26,60	29,61
CR20%	22,01	26,16	33,39
CR50%	23,31	28,45	32,02
CR100%	19,21	28,19	32,43
CMP1%	23,67	30,38	34,00
CMP3%	20,17	27,68	32,35
CRMP20%-1%	24,72	30,84	34,10
CRMP20%-3%	17,82	24,81	33,74
CRMP50%-1%	22,51	27,93	34,69
CRMP50%-3%	19,47	26,19	33,26
CRMP100%-1%	22,95	28,95	33,40
CRMP100%-3%	17,30	24,28	33,44

Tabla 4-1: Resistencia promedio a la compresión.

4.1.1 Resistencia a la compresión a los 7 días

Los cálculos correspondientes al análisis de varianza de un factor (ANOVA) se resumen en la Tabla 4-2, que corresponde a los resultados de la resistencia a la compresión a los 7 días de curado.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Valor-P $P(>F)$
Tratamientos	11	640,75	58,25	157,17	$< 2,2e-16$
Residuos	108	40,03	0,37		
Total	119	680,78			

$P < \alpha$; se rechaza H_0 y se concluye que no todas las medias son iguales, aceptando H_a .

Tabla 4-2: Análisis de varianza de los resultados de resistencia a compresión a los 7 días.

De acuerdo con la Tabla 4-2, el ANOVA, arroja un Valor-P menor a 0,05, por lo tanto, se asume que existe diferencia estadísticamente significativa entre las medias de cada uno de los tratamientos con un nivel de confianza del 95%, de esta manera se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se aprueba la hipótesis alternativa (H_a). Cabe aclarar, que los residuales del modelo ajustado cumplen con los supuestos estadísticos de normalidad, varianza constante e independencia (ver Anexo E).

Una vez se determinó la existencia de diferencias significativas entre los tratamientos del proyecto, se procede estimar cuál de estos tratamientos presentan los mejores o peores resultados a la resistencia a la compresión, para ello se usa el test HSD de Tukey, ya que este procedimiento nos controla el error tipo I. Los resultados de este test se presentan en la Tabla 4-3.

Tratamiento	Resistencia media a la compresión f'_c (MPa)	Grupos
CRMP20%-1%	24,72	a
CMP-1%	23,67	b
CR50%	23,31	bc
CRMP100%-1%	22,95	bc
CRMP50%-1%	22,51	cd
CR20%	22,01	d
CMP-3%	20,17	e
CT	20,11	ef
CRMP50%-3%	19,47	ef
CR100%	19,21	f
CRMP20%-3%	17,82	g
CRMP100%-3%	17,30	g

Tabla 4-3: Comparación entre las resistencias medias a la compresión a los 7 días de curado, mediante el test HSD de Tukey.

Nota. Las letras (a,b,c,d,e,f,g) clasifica en grupos los diferentes tratamientos, los tratamientos con la misma letra no presentan diferencia significativa.

Mediante el test de Tukey se establece que el tratamiento CRMP20%-1% tiene la mayor resistencia (24,72 MPa), mientras que los tratamientos CRMP20%-3% (17,82 MPa) y CRMP100%-3% (17,30 MPa) muestran las resistencias a la compresión más bajas.

Comparando el concreto de referencia (CT) con los otros tipos de concreto, se evidencia que algunos concretos alcanzaron resistencias a la compresión más altas y otros más bajas. Como se observa en la Tabla 4-3, los concretos cuya resistencia estuvieron por debajo del CT fueron los concretos reciclados modificados con 3% de resina de poliéster y el concreto reciclado con 100% de AGR-C. Además, se puede evidenciar que la adición de 1% de resina influye positivamente a la resistencia a la compresión a los 7 días de curado, pues las resistencias de estos concretos se ubican por encima de la resistencia del CT.

Por otra parte, en cuanto al comportamiento de la resistencia a la compresión de los CR, el CR50% presentó la resistencia más alta (23,31 MPa) (ver Figura 4-1).

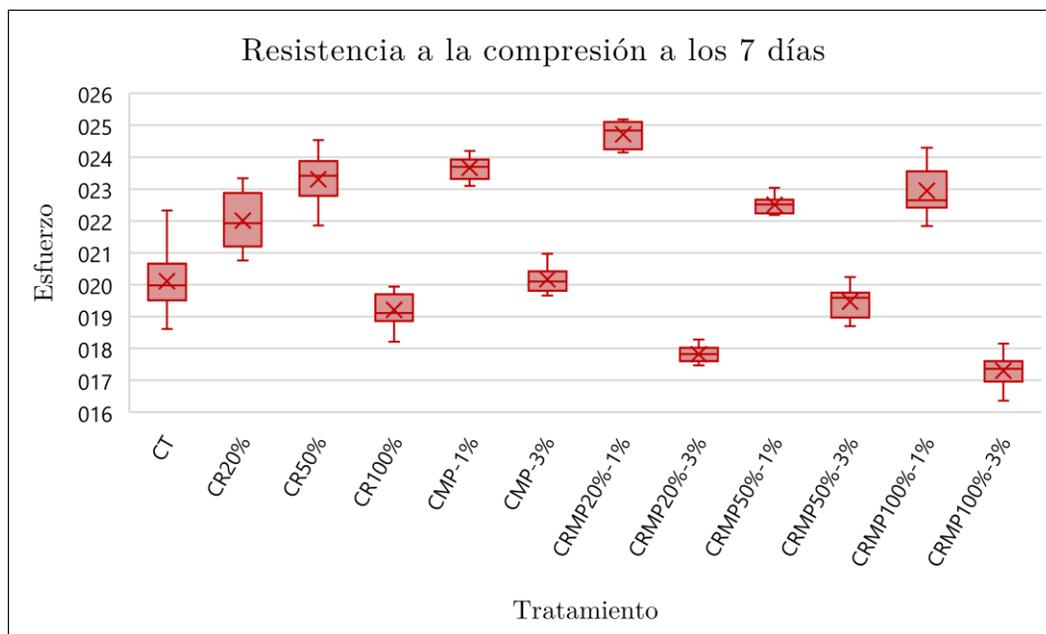


Figura 4-1: Resistencia a la compresión a los 7 días de curado.

4.1.2 Resistencia a la compresión a los 14 días

La Tabla 4-4, presenta los valores obtenidos en el análisis de varianza de un factor (ANOVA).

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Valor-P P(>F)
Tratamientos	11	450,10	40,92	83,08	< 2,2e-16
Residuos	108	53,19	0,49		
Total	119	503,29			

$P < \alpha$; se rechaza H_0 y se concluye que no todas las medias son iguales, aceptando H_a .

Tabla 4-4: Análisis de varianza de los resultados de resistencia a compresión a los 14 días.

El Valor-P presentado en la Tabla 4-4 es menor al nivel de significancia ($\alpha=0,05$), de este modo se concluye que los resultados promedios de las resistencias a la compresión a los 14 días de curado presentan una diferencia significativa, por lo tanto, se rechaza la H_0 y se aprueba la H_a . Cabe aclarar, que los residuales del modelo ajustado cumplen con los supuestos estadísticos de normalidad, varianza constante e independencia (ver Anexo E).

Determinada la existencia de diferencias significativas entre los valores medios de la resistencia a la compresión de los diferentes tipos de concreto, se procede a estimar que resultados fueron los mejores y cuáles los peores en cuanto a esta propiedad, para ello se busca controlar el error tipo I mediante el test HSD de Tukey (ver Tabla 4-5).

Tratamiento	Resistencia media a la compresión f'_c (MPa)	Grupos
CRMP20%-1%	30,84	a
CMP-1%	30,38	a
CRMP100%-1%	28,95	b
CR50%	28,45	bc
CR100%	28,19	bc
CRMP50%-1%	27,93	bc
CMP-3%	27,68	c
CT	26,60	d
CRMP50%-3%	26,19	d
CR20%	26,16	d
CRMP20%-3%	24,81	e
CRMP100%-3%	24,28	e

Tabla 4-5: Comparación entre las resistencias medias a la compresión a los 14 días de curado, mediante el test HSD de Tukey.

Nota. Las letras (a,b,c,d,e) clasifica en grupos los diferentes tratamientos, los tratamientos con la misma letra no presentan diferencia significativa.

De acuerdo con el test de Tukey se estable que el tratamiento CRMP20%-1% y CMP-1% tienen la mayor resistencia (30,84 MPa y 30,38 MPa respectivamente), y no hay diferencias significativas entre ellos, mientras que los tratamientos CRMP20%-3% (24,81 MPa) y CRMP100%-3% (24,28 MPa) muestran nuevamente las resistencias a la compresión más bajas.

La resistencia a la compresión a los 14 días de curado del CT no presenta diferencias estadísticamente significativas con el CRMP50%-3% y CR20%, puesto que las resistencias obtenidas fueron 26,60 MPa, 26,19 MPa y 26,16 MPa respectivamente. En cuanto a la adición de resina de poliéster, se evidencia que con 1% continúa mejorando la resistencia a la compresión y con 3% sigue presentando un comportamiento mecánico menor. Por último, el CR50% sigue presentando una resistencia a la compresión mayor que los demás CR (ver Figura 4-2).

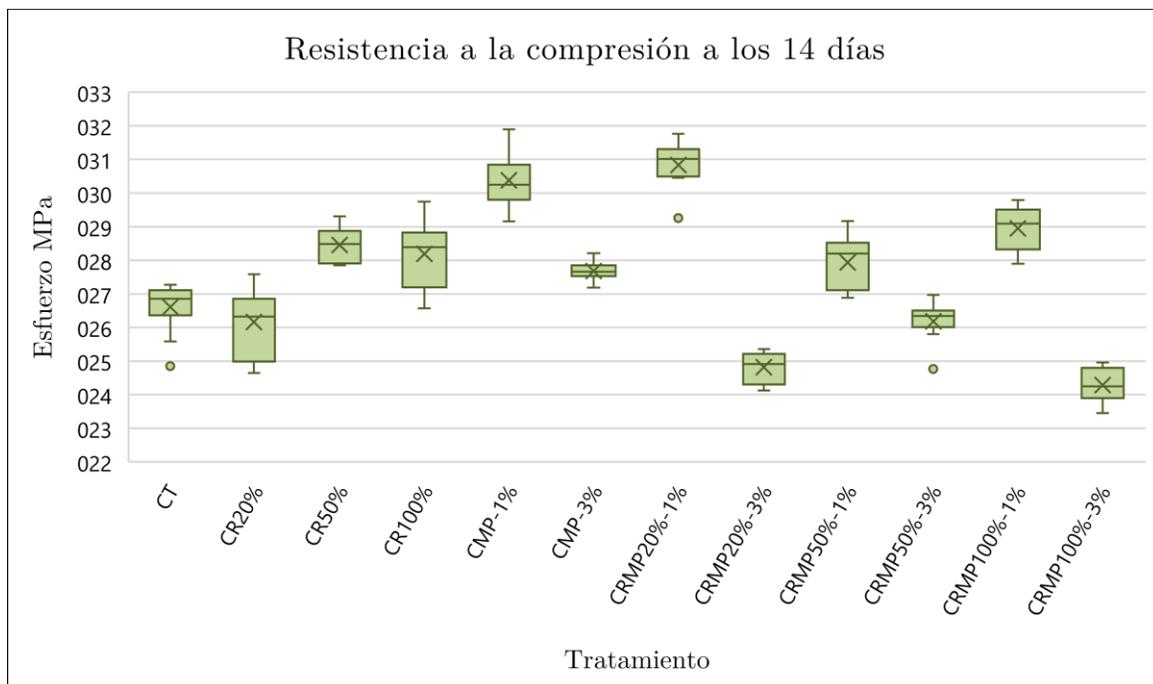


Figura 4-2: Resistencia a la compresión a los 14 días de curado.

4.1.3 Resistencia a la compresión a los 28 días

Como se expuso en el Capítulo 2, la edad normativa en la que se mide la resistencia a la compresión es a los 28 días, pues es en este tiempo donde se logra la mayor ganancia de resistencia, por consiguiente, su análisis mostrará el comportamiento final de las resistencias a la compresión de los diferentes tipos de concreto.

El análisis de varianza de un factor (ANOVA) para las resistencias obtenidas a los 28 días de curado se muestran en la Tabla 4-6.

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	F	Valor-P P(>F)
Tratamientos	11	193,94	17,63	30,3	< 2,2e-16
Residuos	108	62,84	0,58		
Total	119	256,78			

P< α ; se rechaza Ho y se concluye que no todas las medias son iguales, aceptando Ha.

Tabla 4-6: Análisis de varianza de los resultados de resistencia a compresión a los 28 días.

De acuerdo con la Tabla 4-6, se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se aprueba la hipótesis alternativa (H_a), puesto que el Valor-P es menor al nivel de significancia ($\alpha=0,05$), por lo tanto, existen diferencias significativas entre las medias de las resistencias a la compresión a los 28 días. Cabe aclarar, que los residuales del modelo ajustado cumplen con los supuestos estadísticos de normalidad, varianza constante e independencia (ver Anexo E).

Una vez se comprobó la existencia de diferencias significativas entre las medias de las resistencias a la compresión de los diferentes tipos de concreto, se realizó el test HSD de Tukey con el fin de no cometer el error tipo I, este nos permite conocer los mejores y los peores resultados obtenidos para esta propiedad (ver Tabla 4-7).

Tratamiento	Resistencia media a la compresión f'_c (MPa)	Grupos
CRMP50%-1%	34,69	a
CRMP20%-1%	34,10	ab
CMP-1%	34,00	ab
CRMP20%-3%	33,74	ab
CRMP100%-3%	33,44	bc
CRMP100%-1%	33,40	bc
CR20%	33,39	bc
CRMP50%-3%	33,26	bc
CR100%	32,43	cd
CMP-3%	32,35	cd
CR50%	32,02	d
CT	29,61	e

Tabla 4-7: Comparación entre las resistencias medias a la compresión a los 28 días de curado, mediante el test HSD de Tukey.

Nota. Las letras (a,b,c,d,e) clasifica en grupos los diferentes tratamientos, los tratamientos con la misma letra no presentan diferencia significativa.

Los valores obtenidos en el test de Tukey indica que los tratamientos que alcanzaron las resistencias más altas fueron CRMP50%-1% (34,69 MPa), CRMP20%-1% (34,10 MPa), CMP-1% (34,00 MPa) y CRMP20%-3% (33,74 MPa), los cuales no presentan diferencias estadísticamente significativas, además, muestra que el concreto testigo (CT) presentó la resistencia más baja (29,61 MPa). Cabe aclarar que todos los tipos de concreto cumplieron con f'_c expuesta en el capítulo 3, de 28 MPa, pues se obtuvieron resistencias por encima a esta (ver Figura 4-3).

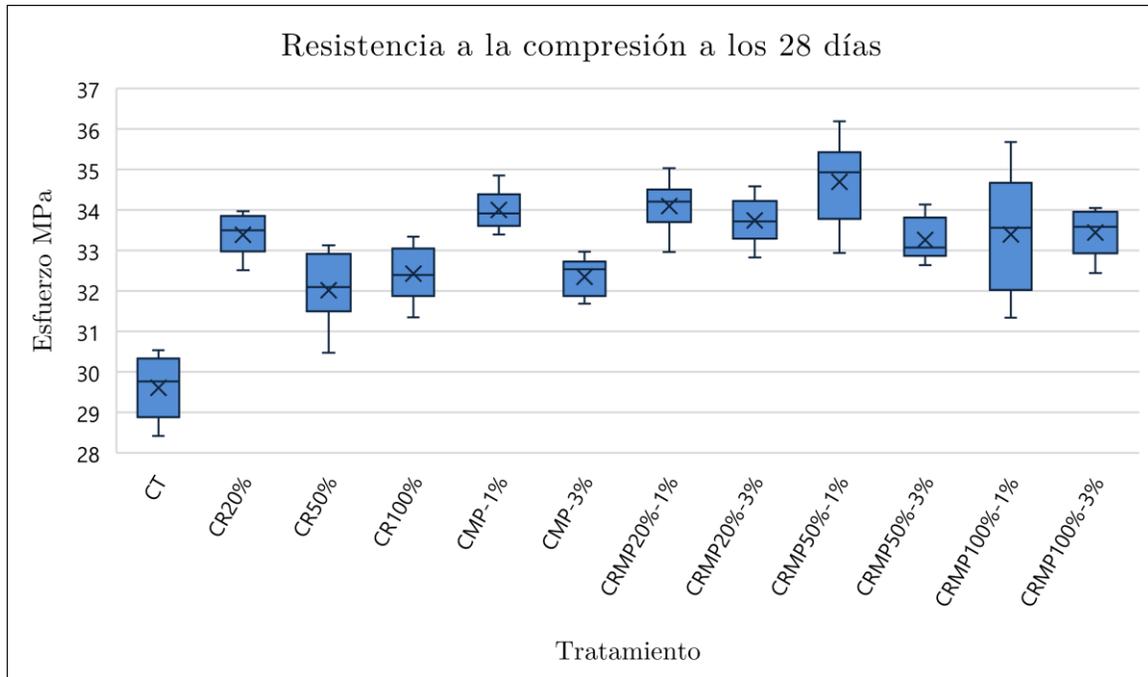


Figura 4-3: Resistencia a la compresión a los 28 días de curado.

De acuerdo con la Tabla 4-7, la resistencia a la compresión de los concretos reciclados es mayor a la del CT, puesto que la resistencia del CR20%, CR100% y CR50% están por encima un 12,77%, 9,52% y 8,14% respectivamente. Este comportamiento podría atribuirse a la alta rugosidad y angularidad de los AGR-C (Batista, 2001; Gonzalez y Etxeberria, 2014; Tuyan et al, 2014), dado que, estas propiedades pueden ser mejoradas en estos agregados dependiendo de la técnica de trituración (Cubas y Cabrera, 2019), permitiendo mayor adherencia de la interfase matriz-agregado.

Otro factor que probablemente influyó en el aumento de f'_c de los CR respecto al CT, fue la procedencia de los AGR-C, pues posiblemente estos agregados fueron utilizados en concretos con alta resistencia, y parte del mortero que componía este concreto se adhirió al AGR-C aportando resistencia al nuevo concreto (Martínez, 2021). Además, como lo expone González (2002), cuando el AGR-C procede de un concreto de alta resistencia, para cualquier relación a/c la resistencia del CR es mayor a la del CT. Sin embargo, la influencia de este factor en el presente proyecto de grado, no se puede comprobar debido al completo desconocimiento de la procedencia de dichos agregados, puesto que la empresa que

comercializa estos materiales no lleva un control ni una clasificación minuciosa respecto a la resistencia de los concretos que se trituran.

En comparación con otros estudios, la resistencia a la compresión del CR en porcentajes de sustitución que van desde 10% al 100% de AGR-C presentan mayor resistencia respecto al CT, tal como ocurre en este caso. Por ejemplo, Laserna (2015) obtiene un aumento de 15% de f'_c con 100% de AGR-C, MaLešev et al (2010) en su investigación alcanza un incremento de 20% y 10% de f'_c en los concretos con 100% y 50% de AGR-C respectivamente, y Martínez (2021) consigue valores de f'_c mayores, en porcentajes de 20% y 18% con sustituciones de 20% y 50% de AGN por AGR-C respectivamente.

Por otra parte, los valores de f'_c de los CMP con 1% y 3% de resina de poliéster, son 14,83% (34,00 MPa) y 9,25% (32,35 MPa) mayores en relación con el CT respectivamente, indicando que la resina de poliéster influye positivamente en f'_c (ACI 548.3R, 2003; Islam et. al, 2011), sin embargo, la adición de 1 % de resina de poliéster presenta el mejor comportamiento.

En cuanto a los CRMP, estos presentaron resistencias superiores a los CR, indicando que la adición de resina de poliéster aumenta la resistencia en este tipo de concretos, esto se evidencia puesto que para el CR20%, con 1% de adición (CRMP20%-1%) y con la adición de 3% (CRMP20%-3%) se alcanza una resistencia mayor en 2,13% y 1,05% respectivamente; para el CR50%, con adición del 1% (CRMP50%-1%) aumenta la resistencia en 8,34% y con adición de 3% (CRMP50%-3%) en 3,87%, y finalmente para el CR100%, el incremento en la resistencia fue de 2,99% y 3,11% con 1% de resina de poliéster (CRMP100%-1%) y con 3% de resina de poliéster (CRMP100%-3%) respectivamente. Este comportamiento también se vio evidenciado en el estudio realizado por Mendivil et al (2017). Además, cabe mencionar que el CRMP50%-1% presentó la resistencia más alta, con un aumento de 17,16% comparado con el CT a los 28 días de curado.

Respecto a lo expuesto en el análisis de los resultados de la resistencia a la compresión de los concretos con adición de resina de poliéster, la Figura 4-1 muestra los cambios que

presentó la resistencia a la compresión a los 28 días del CT y los CR con la adición de 1% y 3% de resina de poliéster, con esto se reafirma que la adición de 1% presentó mejor comportamiento que la adición de 3%.

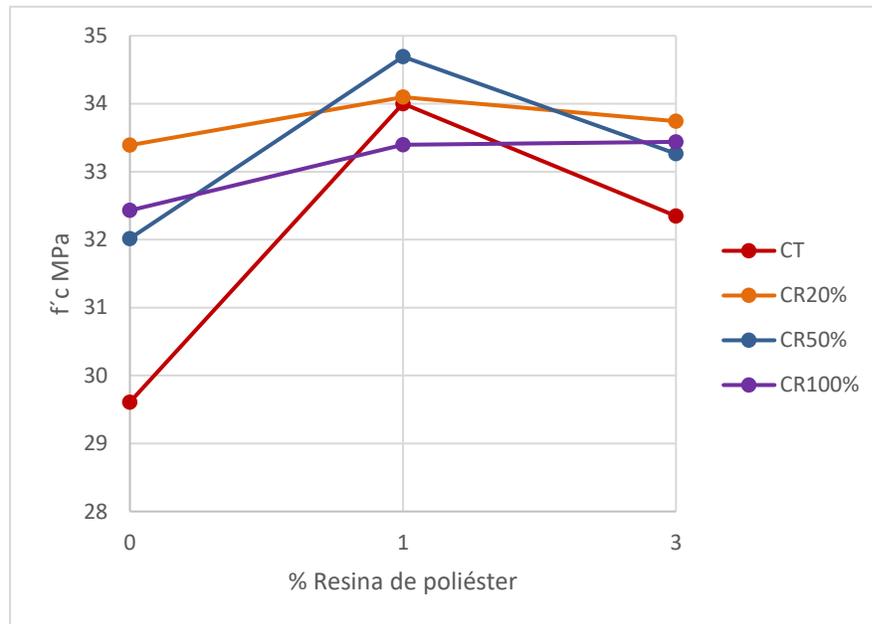


Figura 4-4: Relación entre la resistencia a la compresión a los 28 días de curado y el porcentaje de adición de resina de poliéster.

4.1.4 Resistencia a la compresión a través del tiempo

Con el fin de hacer un análisis más detallado, se realizaron las curvas de evolución de la resistencia del concreto en el tiempo con los valores de la resistencia media de los diferentes tipos de concreto a los 7, 14 y 28 días de curado por inmersión. La Figura 4-2 muestra las curvas de evolución de la resistencia de los CR, la Figura 4-3 muestra el comportamiento correspondiente a los CMP y la Figura 4-4 la evolución de los CRMP.

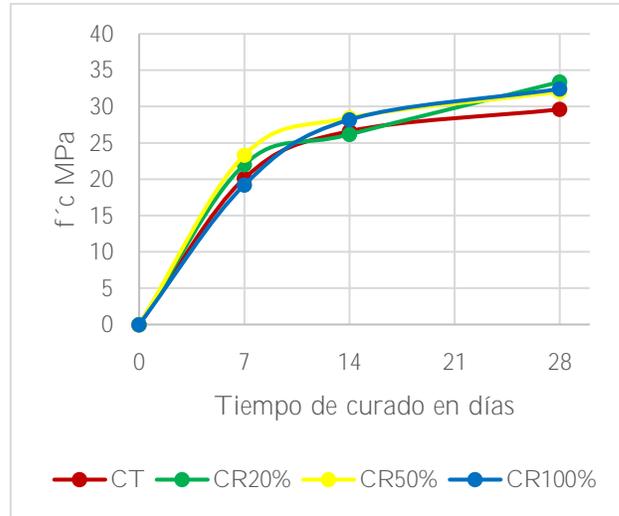


Figura 4-5: Evolución de la resistencia a la compresión para los CR.

De acuerdo con la Figura 4-2, se puede apreciar que la resistencia a la compresión del CT, el CR20%, el CR50% y el CR100% presenta un comportamiento muy similar, con un aumento representativo durante los primeros 7 días de curado y una menor intensidad a partir de este día. Sin embargo, se logra apreciar un ligero aumento de la resistencia a la compresión de los CR entre los 14 y 28 días de curado.

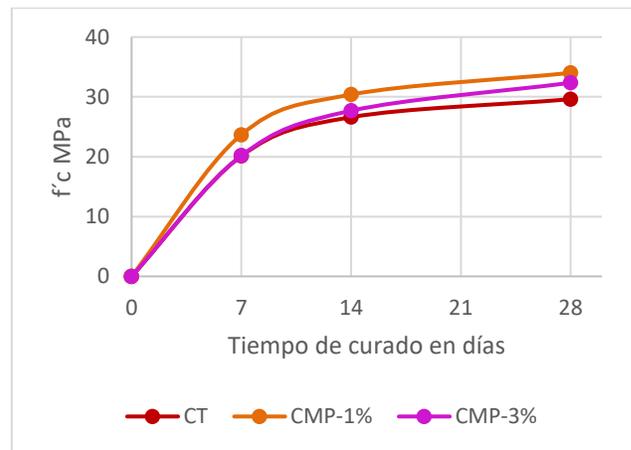


Figura 4-6: Evolución de la resistencia a la compresión de los CMP.

Las curvas de evolución presentadas en la Figura 4-3, muestran que la resistencia del CMP-1% desde edades tempranas presenta un mejor comportamiento mecánico en comparación con el CT y el CMP-3%. Por otra parte, el CMP-3% presenta una mayor ganancia de

resistencia a edades tardías, puesto que hasta los 14 días este concreto no muestra cambios considerables respecto al CT.

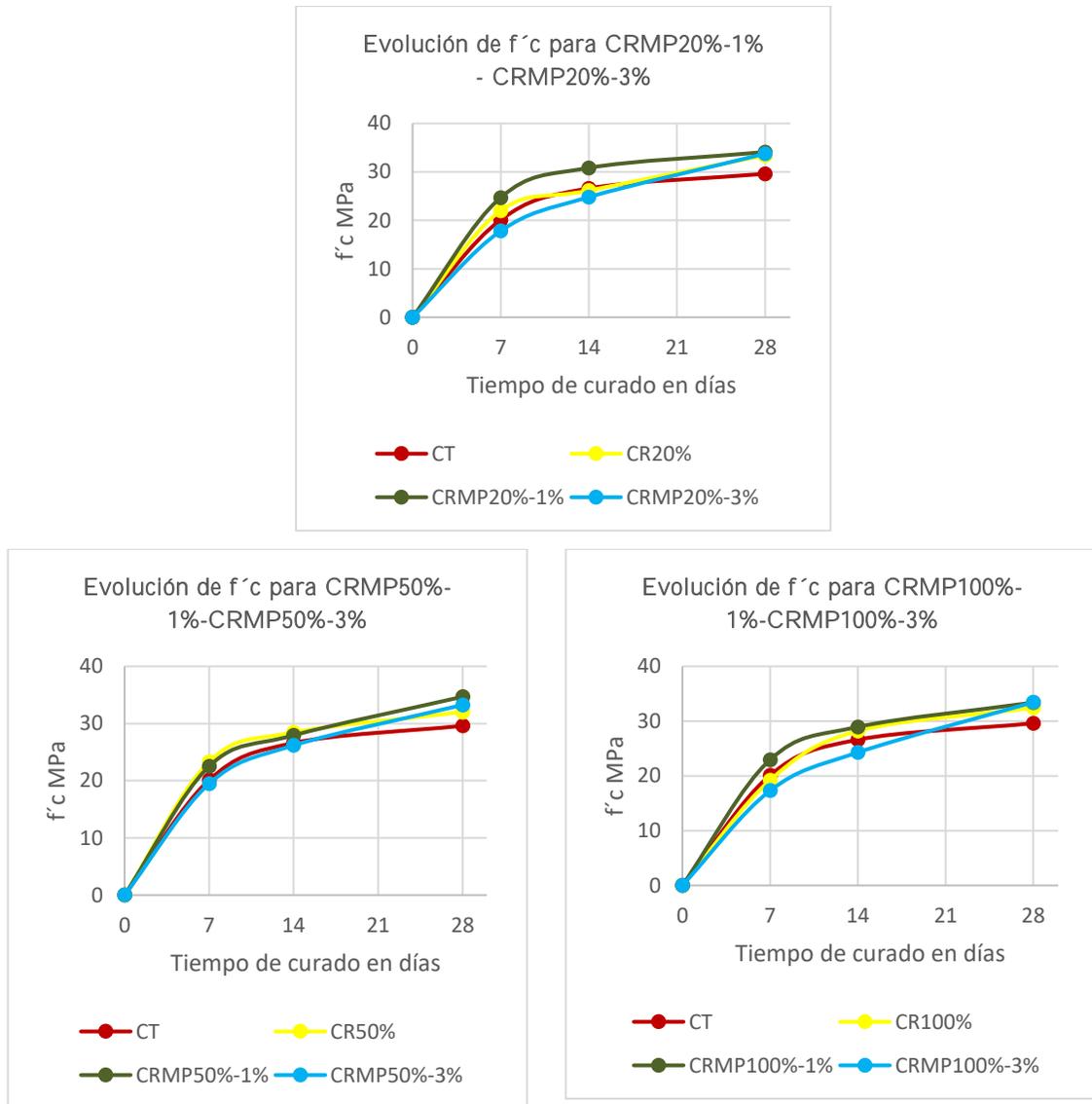


Figura 4-7: Evolución de la Resistencia a la compresión para los CRMP.

La Figura 4-4, muestra el efecto de la adición de resina en los CR, indicando que con 1% de adición de resina de poliéster la resistencia presenta un mejor comportamiento a través del tiempo respecto al 3% de adición del mismo material, sin embargo, la resistencia a los 28 días no muestra una diferencia considerable entre los concretos con estos porcentajes de resina. Por otro lado, la adición de 3% reduce la ganancia de la resistencia hasta los 14 días,

puesto que, entre los 14 y 28 días de curado los concretos con esta adición experimentan una aceleración mayor en el desarrollo de dicha propiedad. Este comportamiento pudo haber ocurrido por una sobredosis de resina de poliéster, puesto que el sobrepasar una dosis óptima de resina da lugar al empaquetamiento de partículas de cemento, retardando el proceso de hidratación (Mendivil et. al, 2017).

4.2 Densidad aparente y absorción del concreto en estado endurecido

Los resultados medios obtenidos de estas propiedades mediante el proceso mencionado en el capítulo 3, se muestran en la Tabla-4-8.

Densidad y absorción a los 28 días							
Tipo de concreto	%Abs. I	%Abs. IH	ρ seca (g/cm ³)	ρ I (g/cm ³)	ρ IH (g/cm ³)	ρ aparente (g/cm ³)	% vacíos
CT	5,718	5,751	2,180	2,305	2,306	2,493	12,534
CR20%	4,547	4,546	2,183	2,283	2,283	2,424	9,923
CR50%	6,131	6,272	2,146	2,277	2,280	2,479	13,443
CR100%	7,548	7,741	2,066	2,222	2,226	2,460	15,967
CMP-1%	6,817	6,829	2,120	2,265	2,265	2,479	14,474
CMP-3%	6,843	6,880	2,110	2,254	2,255	2,468	14,515
CRMP20%-1%	6,878	6,885	2,084	2,228	2,228	2,433	14,337
CRMP20%-3%	7,433	7,466	2,077	2,231	2,232	2,457	15,495
CRMP50%-1%	6,365	6,407	2,013	2,140	2,138	2,302	12,577
CRMP50%-3%	7,049	7,126	2,000	2,141	2,143	2,333	14,243
CRMP100%-1%	8,225	8,261	1,949	2,109	2,110	2,323	16,087
CRMP100%-3%	9,040	9,165	1,915	2,088	2,090	2,322	17,544

Tabla 4-8: Resultados promedios del ensayo de densidad y absorción del concreto en estado endurecido.

Nota.

%Abs. I: Porcentaje de absorción después de inmersión.

%Abs. IH: Porcentaje de absorción después de inmersión y hervido.

ρ : Densidad.

ρ I: Densidad después de inmersión.

ρ IH: Densidad después de inmersión y hervido.

Para una mejor visualización de la variación de los resultados obtenidos de la densidad aparente de los diferentes tipos de concreto a los 28 días de curado, en la Figura 4-5 se presenta su comportamiento.

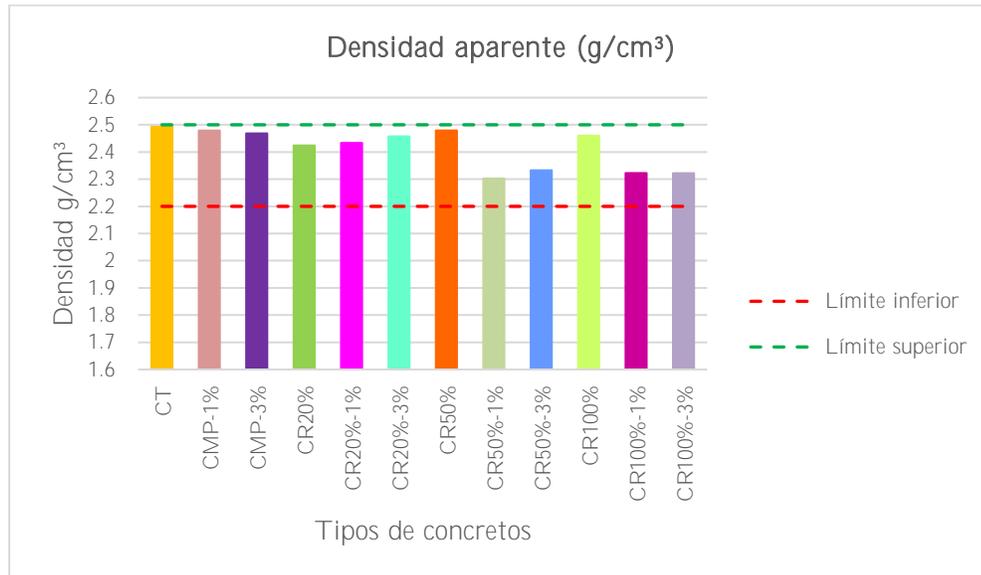


Figura 4-8: Densidad aparente de los diferentes tipos de concreto en estado endurecido.

De acuerdo a la Figura 4-5, todos los concretos presentaron densidades dentro del rango especificado para concretos de peso normal que oscila entre $2,20 \text{ g/cm}^3$ y $2,50 \text{ g/cm}^3$ (Kosmatka et al, 2004; Li, 2011; Niño, 2010; Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2010), siendo la densidad aparente del CT mayor respecto a los demás tipos de concretos ($2,493 \text{ g/cm}^3$).

Comparando la densidad del CT y de los CMP se observa que estos no difieren notablemente, dado que, para el CMP-1% su densidad fue de $2,479 \text{ g/m}^3$ y para el CMP-3% fue de $2,468 \text{ g/cm}^3$ con una variación de 0,56% y 1,01% menor a la del CT respectivamente.

En relación con los CR, el comportamiento de la densidad de estos concretos respecto a la del CT era de esperarse, puesto que la densidad de los AGR-C es menor que la del AGN causando esta disminución (Fernando López, 2008; Navarro, 2014). No obstante, se puede

evidenciar que los resultados para CR no presentan la tendencia en la que a mayor porcentaje de AGR-C menor densidad, pues la densidad del CR20% (2,424 g/cm³) fue menor respecto a las presentadas con sustituciones de 50% (2,479 g/cm³) y 100% (2,460 g/cm³) de AGR-C, aunque todos sus valores estuvieron muy cercanos.

En cuanto a los CRMP, la densidad tiende a ser mayor para aquellos con adición de 3% de resina de poliéster, esto ratifica lo expuesto en otros estudios, donde sostienen que una mayor proporción del polímero aumenta la densidad del concreto (Mendivil et al, 2017; Pothinathan et al, 2021). Además, en estos concretos se puede apreciar que la sustitución del AGN por AGR-C en porcentajes de 50% y 100% y la adición de la resina de poliéster presentaron una disminución notoria de la densidad respecto a los demás concretos, siendo CMPR50%-1% el concreto que presentó la menor densidad (2,302 g/cm³) con una diferencia de 8,3% respecto al CT.

Otro punto a analizar es la variación de los porcentajes de absorción después de inmersión de los diferentes tipos de concretos, los cuales se aprecian en la Figura 4-6.

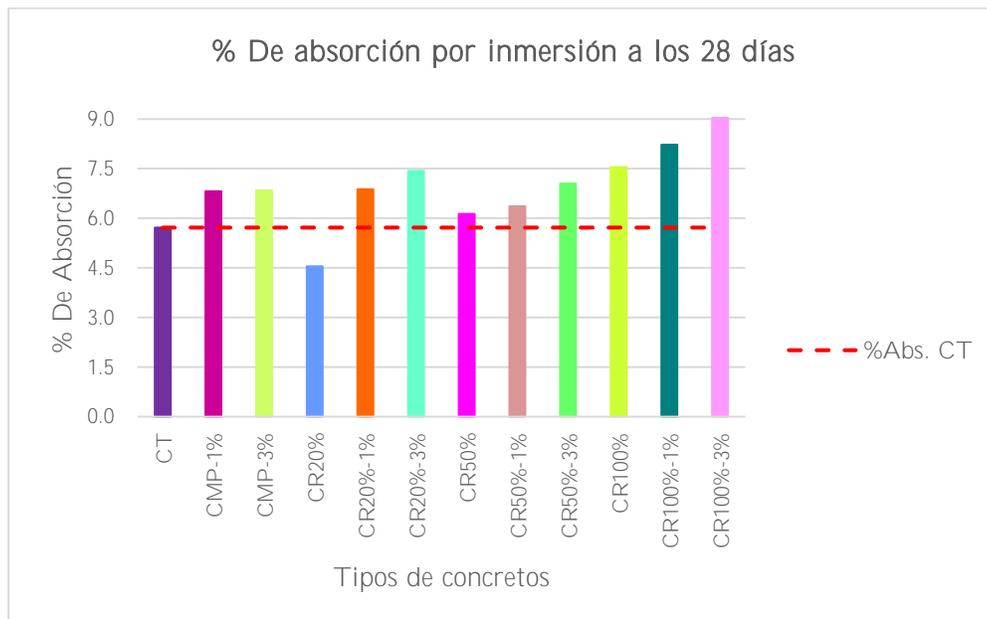


Figura 4-9: Variación del porcentaje de absorción de los diferentes tipos de concreto.

Según la Tabla 4-8 y la Figura 4-6, el CT y el CR20% presentaron los porcentajes más bajos de absorción con 5,718% y 4,547% respectivamente. También, se logra observar la diferencia entre los resultados obtenidos de los CR donde a mayor porcentaje de sustitución de AGR-C mayor la absorción, como consecuencia del alto porcentaje de absorción de los AGR-C. Ahora bien, los concretos que presentaron la mayor absorción fueron el CRMP100%-1% (8,225%) y el CRMP100%-3% (9,040%).

En cuanto a los concretos con resina de poliéster, los CMP (CMP-1% y CMP-3%) presentaron porcentajes de absorción relativamente iguales entre ellos con una diferencia de 0,026% y comparándolos con el CT (5,718%), la absorción del CMP-1% (6,817%) y la del CMP-3% (6,843%) aumentaron en 1,099% y 1,125% respectivamente. Por otro lado, para los CRMP la adición de 3% de resina de poliéster muestra un aumento en la absorción en comparación a la adición de 1%, además, se observa de manera general que la adición de resina en los CR incrementa la absorción, tal es el caso del CR20% (4,547%) respecto al CRMP20%-1% (6,878%) y CRMP20%-3% (7,433%) el cual presenta un aumento de 2,331% y 2,886% con estas adiciones de resina (1% y 3%) respectivamente.

Los cambios de absorción de los diferentes tipos de concretos pudieron haberse dado por la variación del porcentaje de vacíos (porosidad abierta) que se muestran en la Tabla 4-8, donde a mayor porcentaje de vacíos mayor absorción. Esto indica que la resina no selló los canales de poros expuestos al exterior.

Los resultados obtenidos en esta propiedad respecto a los concretos con resina son contrarios a los expuestos por Mendivil et. al (2017) y Z. Zhang et. al (2021), quienes sostienen que la adición de resina de poliéster en porcentajes bajos disminuye la porosidad del concreto y en porcentajes altos aumenta su porosidad, pues existe un límite de adición del polímero que beneficia las propiedades del concreto. De este modo Z. Zhang et. al (2021) expone que al sobrepasar este límite se presenta el aumento de la porosidad, debido al mayor contenido de aire en la mezcla de concreto producto de la alta viscosidad del polímero.

Capítulo 5

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El uso del AGR-C en el concreto generó un buen comportamiento mecánico referente a la resistencia a la compresión, logrando superar el resultado obtenido por el CT. Siendo el CR20% el de mayor resistencia dentro del grupo de los CR con una diferencia por encima de 12,77% en comparación con el CT. De este modo se concluye que es posible fabricar concretos con AGR-C en porcentajes mayores a los expuestos en diferentes normativas a nivel mundial para su uso en estructuras.

La adición de 1% y 3% de resina de poliéster (RP-055T) influye positivamente en la resistencia a la compresión, siendo el 1% la proporción de resina con la que se logra un mejor comportamiento de esta propiedad en comparación al 3%, puesto que los concretos con esta adición (1%) presentaron resistencias superiores a las del CT y los CR, ejemplo de ello es el CRMP50%-1%, el cual resultó ser el concreto con la mayor resistencia, con una diferencia de 17,16% mayor respecto al CT.

Los CR lograron mejorar la resistencia a la compresión mediante la adición de la resina de poliéster (RP-055T), con esto se concluye que el uso de este tipo de polímero en las mezclas de concreto reciclable es aceptable.

En cuanto a la densidad, la incorporación de AGR-C al concreto, produce una disminución de esta, siendo esto un comportamiento normal en los CR debido a las características propias del AGR-C que los componen, tales como una elevada absorción y porosidad, y una densidad menor a la de un AGN. Por otro lado, la adición de la resina de poliéster (RP-055T) presenta un pequeño aumento de esta propiedad cuando se adiciona un 3% en comparación al 1%. Cabe mencionar que de manera general el CT mostró ser el más denso, sin embargo, todos los concretos del estudio presentaron densidades que se encuentran dentro del rango establecido para ser clasificados como concretos de peso normal ($2,2 \text{ g/cm}^3$ - $2,5 \text{ g/cm}^3$).

La absorción del concreto de manera general aumenta con la adición de resina de poliéster (RP-055T), de esta manera se concluye que este polímero no sella los canales de poros abiertos. Por otra parte, la incorporación del AGR-C provoca el mismo efecto en esta propiedad, debido al alto porcentaje de absorción que presentan los AGR-C por el contenido de mortero adherido en los mismos.

Con este proyecto de grado se espera promover el uso del CR como concreto estructural, pues como se evidenció, tanto los CR estudiados y los CRMP presentan un buen comportamiento mecánico. Esto permitirá reducir la contaminación generada por la industria de la construcción y aportar a la conservación del planeta. Por una parte, se da uso a materiales producto de los residuos de construcción y demolición como lo es el AGR-C y por otra se disminuye la explotación de los recursos naturales como el AGN.

5.2 Recomendaciones

- Para el uso de los AGR-C es necesario conocer la procedencia de estos, lo cual permitirá obtener mejores propiedades tanto físicas como mecánicas de los concretos producidos con estos agregados. Para ello, sus empresas productoras y comercializadores deberán clasificar por resistencia a la compresión y descontaminar los AGR-C garantizando materiales de excelente calidad.

- Incursionar por parte de las empresas comercializadoras de agregados y productoras de concretos en el uso del AGR-C, puesto que se ha evidenciado que estos son competentes si se les realizan los tratamientos y controles adecuados.
- Para evitar la pérdida rápida de fluidez del concreto debido a la alta absorción que presentan los AGR-C, se recomienda saturar estos por 24 horas y utilizarlos saturados superficialmente secos.
- Evaluar el efecto de la incorporación del AGR-C y la adición de resina de poliéster (RP-055T) a nivel microestructural y macroestructural. Esto permitirá dar respuesta al comportamiento de la absorción y la porosidad presentado en esta investigación de manera más precisa.
- Realizar el estudio de la adición de resina de poliéster (RP-055T) en el concreto, con porcentajes dentro del rango expuesto en esta investigación (1%-3%) para lograr establecer el límite o cantidad optima y así evitar efectos negativos en las propiedades del concreto causados por la sobredosis de este polímero.
- Se propone estudiar las propiedades físicas en estado fresco, la durabilidad, la resistencia al fuego y la influencia del acero en los tipos de concretos presentados en esta investigación.
- Estudiar la relación costo-beneficio generado por la producción y uso de CR, CMP y CRMP frente al concreto convencional en el campo de la construcción.
- Evaluar el impacto ambiental de la incorporación del AGR-C y la adición de resina de poliéster en el concreto.

Bibliografía

- 360 en concreto. (s.f.-a). Agregados reciclados: ¿Qué y para qué? Obtenido de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/agregados-reciclados-que-y-para-que>
- 360 en concreto. (s.f.-b). *Pasa tamiz 200 y desempeño en el concreto*. Recuperado el 23 de 11 de 2021, de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/pasa-tamiz-200-y-desempeno-en-el-concreto-1#:~:text=El%20porcentaje%20de%20material%20que,y%20son%20causantes%20de%20fisuras>.
- 360 en concreto. (s.f.-c). Caracterización de impactos ambientales en la industria de la construcción. (Argos, Ed.) Recuperado el 27 de 02 de 2020, de Argos: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/sostenibilidad/impactos-ambientales-en-la-industria-de-la-construccion>
- Agencia Nacional de Minería. (2020). *Producción Nacional Rocas y Materiales de Construcción I Trimestre 2020*. Obtenido de <https://www.anm.gov.co/?q=content/producci%C3%B3n%2Anacional%2Arocas%2Ay%2Amateriales%2Ade%2Aconstrucci%C3%B3n%2Ai%2Atrimestre%2A2020>
- Agencia Nacional de Minería. (2021). *Producción Nacional Rocas y Materiales de Construcción I Trimestre 2021*. Obtenido de <https://www.anm.gov.co/?q=content/producci%C3%B3n%2Anacional%2Arocas%2Ay%2Amateriales%2Ade%2Aconstrucci%C3%B3n%2Ai%2Atrimestre%2A2021>
- Aguado, A., & Salla, J. (1987). Los hormigones con polímeros en la construcción: propiedades y aplicaciones. *Informes de la construcción*, 39(389). Obtenido de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/download/1665/1844>

- American Concrete Institute. (1997). *Guide for the Use of Polymers in Concrete (ACI 548.1R-97)*. Estados Unidos: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2003). *Polymer-Modified Concrete (ACI 548.3R-03)*. Estados Unidos: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2005). *Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318SR-05)*. Estados Unidos: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (2009). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*. Estados Unidos : American Concrete Institute.
- Argos. (2019). *Ficha técnica/versión 8. Cemento gris de uso general*. Colombia. Obtenido de <https://colombia.argos.co/wp-content/uploads/2020/09/FT-CEMENTO-GRIS-USO-GENERAL-2019-2.pdf>
- Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). (Septiembre de 2006). *Utilización de árido reciclado para fabricación de hormigón estructural*. Madrid, España: ACHE (Asociación Científico Técnica del Hormigón Estructural).
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 Tomo 2*. Bogotá, Colombia: Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
- Batista, M. (2001). *Avaliacao de propriedades mecanicas de concretos produzidos com agregados reciclados de residuos de construcao y demolicao*. [Tesis de Doctorado]. Universidad Federal de Rio Grande del Sur, Porto Alegre.
- Cáceres, E., & Valencia, V. (2018). *Estudio de la influencia del tipo y porcentaje de remplazo de los agregados reciclados en las propiedades del concreto, para diseños de $f'c$ 175, 210, 280 Kg/cm², en la ciudad de Arequipa*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú.
- Carrión, F., Montalbán, L., Real, J., & Real, T. (2014). Mechanical and physical properties of polyester polymer concrete using recycled aggregates from concrete sleepers. *The Scientific World Journal*, 2014. doi:<https://doi.org/10.1155/2014/526346>
- Cortes, E., & Perilla, J. (2014). *Estudio comparativo de las características físico-mecánicas de cuatro cementos comerciales Portland tipo I*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.

- Cubas, H., & Cabrera, J. (2019). *Influencia de la adición de agregado grueso reciclado en la resistencia a compresión de un concreto convencional*. [Tesis de pregrado]. Universidad Peruana Unión, Lima.
- Diosa, J. (2020). *Análisis experimental de las propiedades mecánicas del concreto de alta resistencia fabricado con agregados reciclados de concreto*. [Tesis de Maestría]. Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia.
- EHE-08 Instrucción de Hormigón Estructural. (2011). Anejo 15. *Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados*. España: Ministerio de fomento.
- Enshassi, A., Kochendoerfer, B., & Rizq, E. (2014). An evaluation of environmental impacts of construction projects. *Revista ingeniería de construcción*. doi:<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732014000300002>
- Fowler, D. (1999). Polymers in concrete: a vision for the 21st century. *Cement and Concrete Composites*, 21, 449-452. doi:[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(99\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(99)00032-3)
- Fritts, R. (2019). The world needs to get serious about managing sand, U.N. report says. *Science*. doi:10.1126 / science.aay0017
- García, C. (2012). *Hormigón reciclado de aplicación estructural: Durabilidad en ambiente marino y comportamiento a fatiga*. [Tesis doctoral]. Universidad de Cantabria, Cantabria, España.
- García, M. (2017). *Estudio de durabilidad y comportamiento mecánico en hormigones y materiales tratados con cemento, aplicando residuos industriales y áridos reciclados*. [Tesis doctoral]. Universidad de Cordoba, Córdoba, España.
- Giraldo, O. (2004). *Diseño de mezclas de hormigón métodos empíricos y analíticos*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Giraldo, S. (2015). *Concreto polimérico elaborado con cargas cerámicas recicladas*. [Tesis de Pregrado]. Escuela de Ingeniería de Antioquia, Envigado. Obtenido de <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2055>
- Gonzalez, A., & Etxeberria, M. (2014). Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 52, 227-235. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.054>
- González, F. (2002). *Hormigones con áridos reciclados procedentes de demoliciones: dosificaciones, propiedades mecánicas y comportamiento estructural a cortante*. [Tesis Doctoral]. Universidade da Coruña, Coruña, España.

- Google. (s.f.-a). [MASSEQ, Tesalia, Huila]. Obtenido de <https://earth.google.com/web/search/MASSEQ,+Tesalia,+Huila>
- Google. (s.f.-b). [Reciclados Industriales-Calle 80, Cota, Cundinamarca]. Obtenido de [https://earth.google.com/web/search/Reciclados+ Industriales+ +Calle+80,+Cota,+Cundinamarca](https://earth.google.com/web/search/Reciclados+Industriales++Calle+80,+Cota,+Cundinamarca)
- Gorninski, J., Dal Molin, D., & Kazmierczak, C. (Septiembre de 2007). Strength degradation of polymer concrete in acidic environments. *Cement and Concrete Composites*, 29, 637-645. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.001>
- Guardian, H., Garcés, P., Zornoza, E., & García, E. (2021). Comportamiento de hormigones con adiciones puzolánicas y árido reciclado. *ALCONPAT*, 11(3), 17-30. doi:<https://doi.org/10.21041/ra.v11i3.542>
- Gutiérrez, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Hameed, A., & Hamza, M. (2019). Characteristics of polymer concrete produced from wasted construction materials. *Energy Procedia*, 43-50. doi:<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.162>
- Hermida, É. (2011). Polímeros. *Materiales y materias primas*. Buenos Aires, Argentina. Obtenido de http://inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/09_Polimeros.pdf?fbclid=IwAR2bKLI9qi1TqOnNYOn8nZW1-sijw65QCVVO9VvjN4APn3mphVB8p0IfH14
- Hernández, B. (2016). *Propiedades físicas y mecánicas de concreto con agregado grueso reciclado pre-tratado*. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2006). *Metodología de la Investigación* (Cuarta ed.). Iztapalapa, México D.F: McGraw-Hill/Interamericana.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2008). *Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido (NTC 5653)*. Bogotá, D.C, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2010). *Concretos. Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (NTC 673)*. Bogotá, D.C, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2010). *Ingeniería civil y arquitectura. Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos en el laboratorio (NTC 1377)*. Bogotá, D.C, Colombia: ICONTEC.

- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2018). *Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto (NTC 174)*. Bogotá, D.C, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2018). *Concretos. Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto (NTC 396)*. Bogotá, D.C, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2018). *Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos (NTC 77)*. Bogota, D.C, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019). *Método de ensayo para determinar el contenido total de humedad evaporable por secado de los agregados (NTC 1776)*. Bogotá, D.C, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019). *Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado grueso (NTC 176)*. Bogotá, D.C, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019). *Método de ensayo para determinar por lavado el material que pasa el tamiz 75 μ M (No.200) en agregados minerales (NTC 78)*. Bogotá, D.C, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2019). *Método de ensayo para la determinación de la densidad volumétrica (masa unitaria) y vacíos en agregados (NTC 92)*. Bogotá, D.C, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2020). *Método de ensayo para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino (NTC 237)*. Bogotá, D.C, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021). *Ensayo de Clasificación de los componentes de los agregados gruesos reciclados (NTC 6422)*. Bogotá, D.C, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021). *Especificación de desempeño para cemento hidráulico (NTC 121)*. Bogotá, D.C, Colombia: ICONTEC.
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2021). *Agregados gruesos reciclados para uso en el concreto hidráulico (NTC 6421)*. Bogotá, D.C, Colombia: ICONTEC.

- Instituto del Concreto. (2000). *Tecnología y Propiedades* (Cuarta ed.). Bogotá, D.C., Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto.
- Ion, I., Barroso, J., Angelescu, N., & Stanciu, D. (2013). Properties of polymer modified concrete in fresh and hardened state. *Advanced Materials Research*, 687, 204-212. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.687.204>
- Islam, M., Rahman, M., & Ahmed, M. (2011). Polymer-modified Concrete: World Experience and Potential for Bangladesh. *The Indian Concrete Journal*, 22, 55-63.
- Jiménez, F. A. (29 de Agosto de 2017). Minería: ilegalidad hasta en la extracción de arena. *El colombiano*. Obtenido de <https://www.elcolombiano.com/negocios/canteras-ilegales-de-arena-y-grava-en-colombia-LH7191872>
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas del concreto* (Primera ed.). Skokie, Illinois, EEUU: Portland Cement Association.
- Lara, A. (2016). *Caracterización de propiedades de hormigón con fibras sintéticas modificados con polímeros*. [Tesis de Pregrado]. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11673/23571>
- Laserna, S. (2015). *Avances en el comportamiento del hormigón reciclado: Fabricación, propiedades mecánicas y simulación numérica*. [Tesis doctoral]. Universidad de Castilla- La Mancha, Albacete, España.
- Ley, C. (2007). *Obtención y caracterización de nanocompuestos de resina poliéster y montmorillonitas funcionalizadas*. [Tesis de Maestría]. Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C, México. Obtenido de https://cicy.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1003/1378/1/PMP_M_Tesis_2007_Cinthia_Ley_Leal.pdf
- Li, Z. (2011). *Advanced concrete technology*. Hoboken, New Jersey, Estados Unidos de America: John Wiley & Sons.
- López, A. (2016). *Estudio de hormigones con bajo contenido de cemento y áridos reciclados*. [Tesis doctoral]. Universidad de Córdoba, Córdoba, España.
- López, F. (2004). *Fundamento de polímeros*. Mérida, Venezuela: Universidad de los Andes. doi:10.13140/RG.2.1.2573.0000
- López, F. (2008). *Influencia de la variación de los parámetros de dosificación y fabricación de hormigón reciclado estructural sobre sus propiedades físicas y mecánicas*. [Tesis Doctoral]. Universidad de Oviedo, Gijón, España.

- Mahdi, F., Abbas, A., & Khan, A. (2010). Strength characteristics of polymer mortar and concrete using different compositions of resins derived from post-consumer PET bottles. *Construction and Building Materials*, 25-36. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.006>
- Malešev, M., Radonjanin, V., & Marinković, S. (2010). Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete. *Sustainability*, 2, 1204-1225. doi:[doi:10.3390/su2051204](https://doi.org/10.3390/su2051204)
- Martínez, R. (2021). *Evaluación del uso de áridos reciclados de hormigón en la fabricación de hormigones autocompactantes y morteros de cemento*. [Tesis Doctoral]. Universidad de León, León, España.
- Mena, C., & Valdés, Y. (2014). *Dosificación óptima de una mezcla de concreto con materiales reciclables procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) de la ciudad de Cali para uso en obras viales de bajo tránsito*. [Proyecto de grado]. Pontificia Universidad Javeriana, Cali, Colombia.
- Mendivil, J., Gómez, J., Almaral, J., & Cabrera, F. (2017). Metamorphosis in the Porosity of Recycled Concretes Through the Use of a Recycled Polyethylene Terephthalate (PET) Additive. Correlations between the Porous Network and Concrete Properties. *Materials*, 10(2), 176. doi:<https://doi.org/10.3390/ma10020176>
- Mendivil, J., Gómez, J., Castro, A., Corral, R., Arredondo, S., & Almaral, J. (2015). Evaluación de la carbonatación de concreto modificado con polímero, utilizando agregado grueso y tereftalato de polietileno reciclados. *In Ponencias del II Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería 2015: Los Mochis, Sinaloa, México: 18-20 noviembre 2015*, 1-13.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo sostenible. (3 de Marzo de 2017). *Minambiente reglamenta manejo y disposición de residuos de construcción y escombros*. Obtenido de Minambiente: <https://www.minambiente.gov.co/index.php/noticias-minambiente/2681-minambiente-reglamenta-manejo-y-disposicion-de-residuos-de-construccion-y-escombros>
- Mora, D. (2016). *Propiedades mecánicas y de permeabilidad de concreto fabricado con agregado reciclado*. [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- Navarro, Á. (2014). *Uso y fomento del árido reciclado en hormigón estructural como oportunidad de mejora medioambiental y económica. Aplicación a la comunidad autónoma de La Rioja*. [Tesis Doctoral]. Universidad de La Rioja, Logroño, España.

- Neville, A., & Brooks, J. (2010). *Concrete technology* (Segunda ed.). Harlow, Inglaterra: Pearson Education.
- Nieto, D. (2015). *Estudio de hormigón autocompactante con árido reciclado*. [Tesis Doctoral]. Universidad politecnica de Madrid, Madrid, España.
- Niño, J. (2010). *Tecnología del concreto tomo 1: Materiales, propiedades y diseño de mezclas* (Tercera ed.). Bogotá D.C: Asocreto.
- Nodehi, M. (2021). Epoxy, polyester and vinyl ester based polymer concrete: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(64). doi:[https://doi-org.usco.basesdedatosezproxy.com/10.1007/s41062-021-00661-3](https://doi.org/usco.basesdedatosezproxy.com/10.1007/s41062-021-00661-3)
- Ohama, Y. (2011). Concrete-Polymer Composites – The Past, Present and Future. *Key Engineering Materials*, 466, 1-14. doi:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.466.1>
- Ohama, Yoshihiko. (1998). Polymer-based Admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 20, 189-212. doi:[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00065-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00065-6)
- Ortega, J. (2017). *Impactos ambientales ocasionados por la explotación artesanal de materiales de construcción: El caso del transecto del Río Cesar, en el municipio de San Juan del Cesar, La Guajira*. [Tesis de Maestría]. Universidad de Manizales, Manizales, Colombia.
- Pérez, J. (2011). *Estudio experimental sobre propiedades mecánicas del hormigón reciclado con áridos procedentes de la no calidad en prefabricación*. [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Pothinathan, S., Muthukannan, M., Selvapalam, N., & Gnanaraj, S. C. (2021). Investigation on strength properties of polymer modified concrete using glycoluril. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 12(3), 278-284. doi:<https://doi.org/10.1556/1848.2021.00271>
- Ramírez, C., Bocanegra, R., Santacruz, S., Quintero, H., & Sandoval, M. (2009). Metodología para estimar los volúmenes máximos de explotación de materiales de arrastre en un río. *Ingeniería y Competitividad*, 11(2), 53-61.
- Ramírez, J. (1998). La múltiple identidad del hormigón. *Informes de la Construcción*, 49(454), 77-82. doi:<https://doi.org/10.3989/ic.1998.v49.i454.912>
- Ramis, X. (1994). *Estudio de la eficiencia de sistemas químicos del curado de resinas de poliéster insaturado (Tesis Doctoral)*. Universidad Politecnica de Cataluña, Barcelona, España. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/93997>

- Rodríguez, F. (2014). *Uso de polímeros en la reducción de patologías de origen químico en estructuras de concreto*. [Trabajo de Pregrado]. Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1517/1/Tesis%20Uso%20de%20Pol%C3%ADmeros.pdf>
- Ruelas, E. (2015). *Uso de pavimento rígido reciclado de la ciudad de Puno, como agregado grueso para la producción de concreto*. [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Safiuddin, M., Johnson, U., Rahman, M., Salam, A., & Zamin, M. (2013). Use of recycled concrete aggregate in concrete: a review. *Journal of Civil Engineering and Management*. doi:10.3846/13923730.2013.799093
- Sánchez, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (Quinta ed.). Santafé de Bogotá D.C, Colombia: BHANDAR editores LTDA.
- Sánchez, M. (2004). *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural*. [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. Obtenido de <http://oa.upm.es/381/>
- Shaker, F., El-Dieb, A., & Reda, M. (1997). Durability of styrene-butadiene latex modified concrete. *Cement and Concrete Research*, 711-720. doi:[https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00055-0)
- Shokrieh, M., Rezvani, S., & Mosalmani, R. (Octubre de 2017). Mechanical behavior of polyester polymer concrete under low strain. *Polymer testing*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.09.015>
- Tuyan, M., Mardani-Aghabaglou, A., & Ramyar, K. (2014). Freeze–thaw resistance, mechanical and transport properties of self-consolidating concrete incorporating coarse recycled concrete aggregate. *Materials & Design*, 53, 983-991. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.07.100>
- Valencia, M. E., Collazos, P. A., Mina, J. H., & Toro, E. F. (2010). Caracterización fisicomecánica de concreto polimérico basado en resina de poliéster. *Revista Científica de Guillermo de Ockham*, 8(1), 83-93.
- Varela, E. (2012). *Evaluación de la sostenibilidad ambiental de hormigones con áridos reciclados procedentes de residuos de Construcción y demolición*. [Tesis Doctoral]. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, Cataluña, España.

Zhang, Z., Zhang, H., Liu, T., & Lv, W. (2021). Study on the micro-mechanism and structure of unsaturated polyester resin modified concrete for bridge deck pavement. *Construction and Building Materials*, 289. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123174>.

A. Anexo: Resultados de los ensayos de
caracterización de los agregados

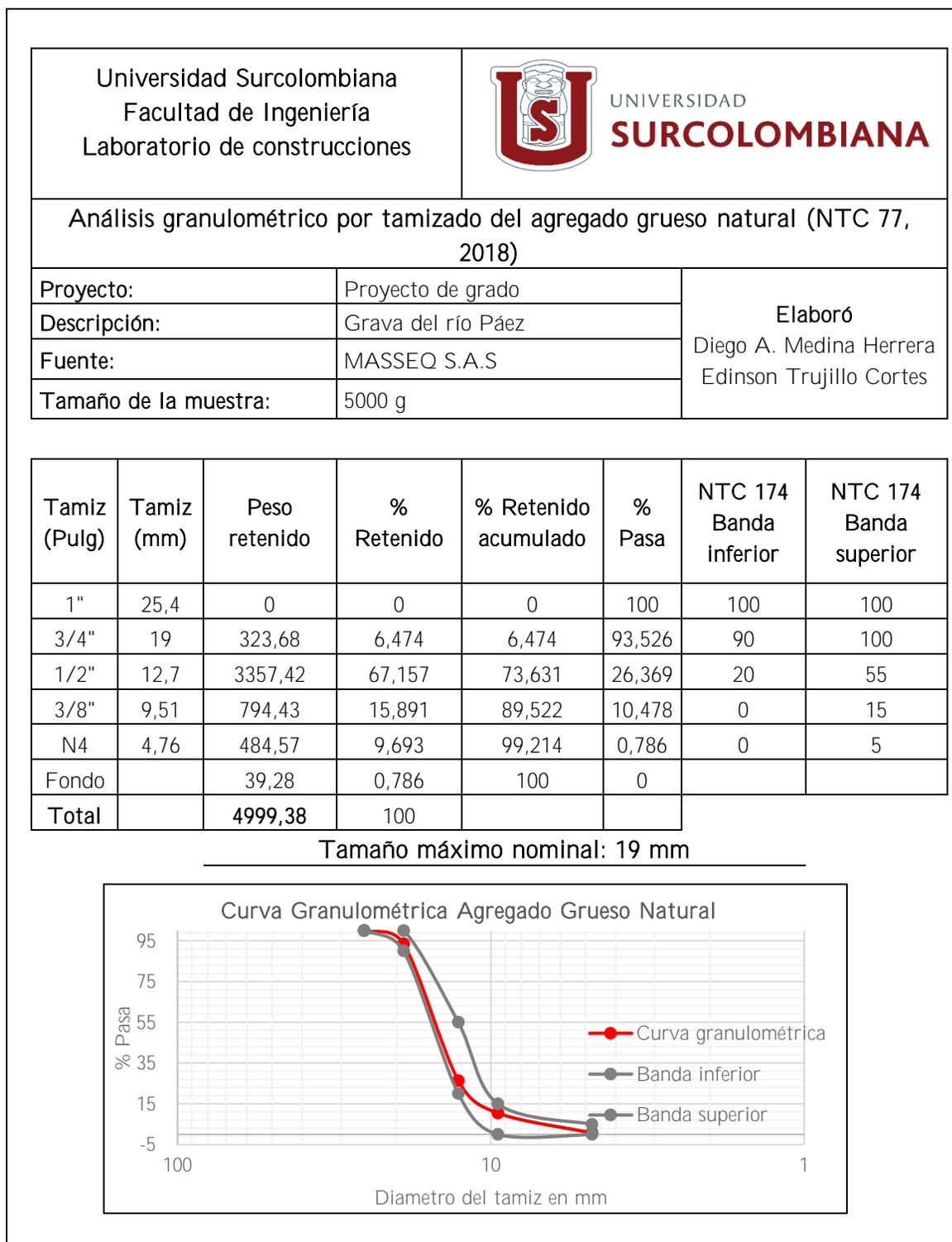


Tabla A-1: Análisis granulométrico del AGN.

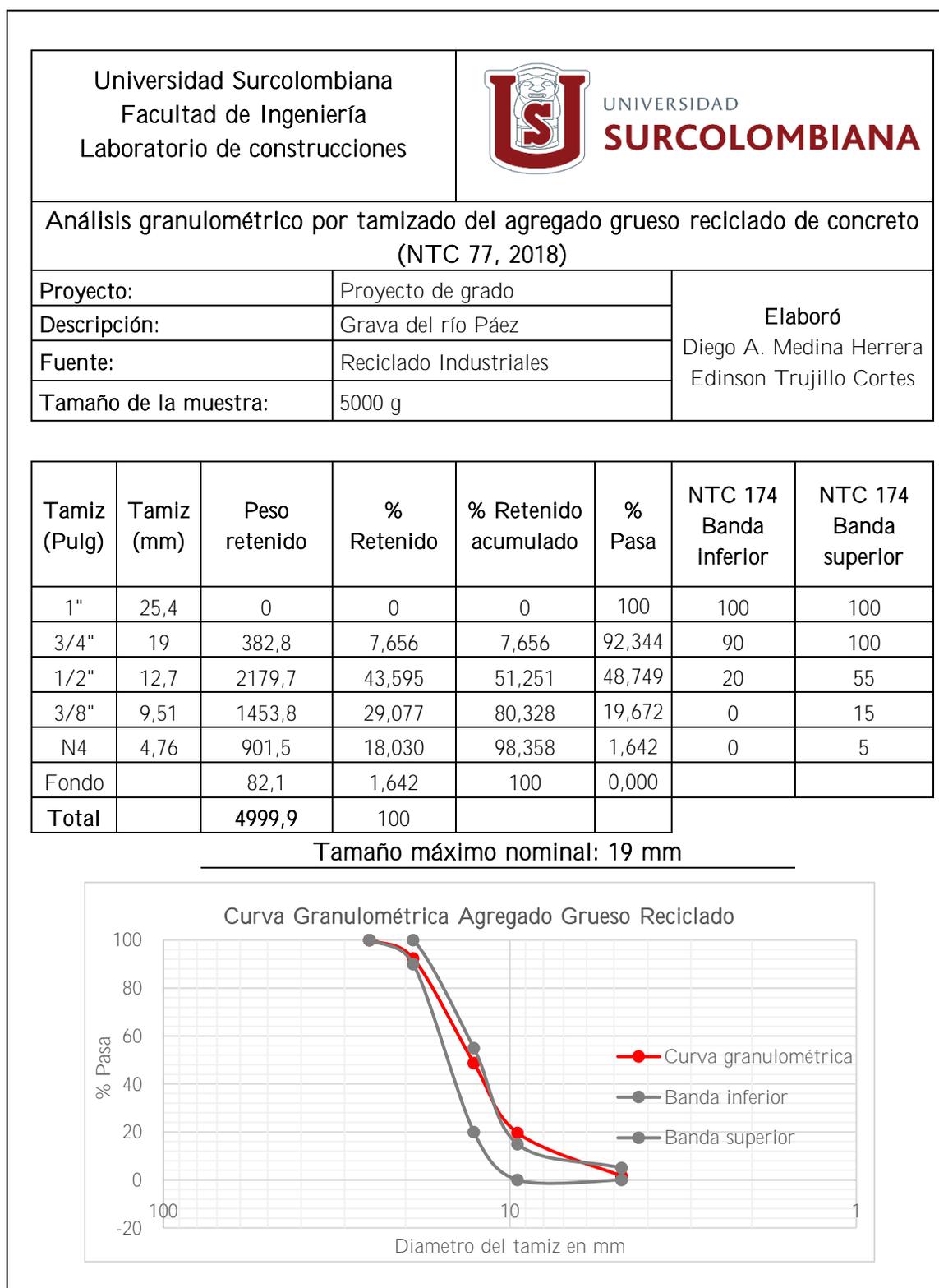


Tabla A-2: Análisis granulométrico del AGR-C.

Universidad Surcolombiana
Facultad de Ingeniería
Laboratorio de construcciones



Análisis granulométrico por tamizado del agregado fino (NTC 77, 2018)

Proyecto:	Proyecto de grado	Elaboró Diego A. Medina Herrera Edinson Trujillo Cortes
Descripción:	Arena del río Páez	
Fuente:	MASSEQ S.A.S	
Tamaño de la muestra:	1000 g	

Tamiz (Pulg)	Tamiz (mm)	Peso retenido	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa	NTC 174 Banda inferior	NTC 174 Banda superior
3/8"	9,5	0	0,000	0,000	100	100	100
N4	4,75	92,6	9,261	9,261	90,739	95	100
N8	2,36	184,8	18,482	27,743	72,257	80	100
N16	1,18	197,1	19,712	47,455	52,545	50	85
N30	0,595	144,7	14,471	61,926	38,074	25	60
N50	0,297	164,5	16,452	78,378	21,622	5	30
N100	0,149	93,7	9,371	87,749	12,251	0	10
N200	0,075	84,6	8,461	96,210	3,790	0	3
Fondo		37,9	3,790	100	0		
Total		999,9	100				

Módulo de finura MF: 3,125

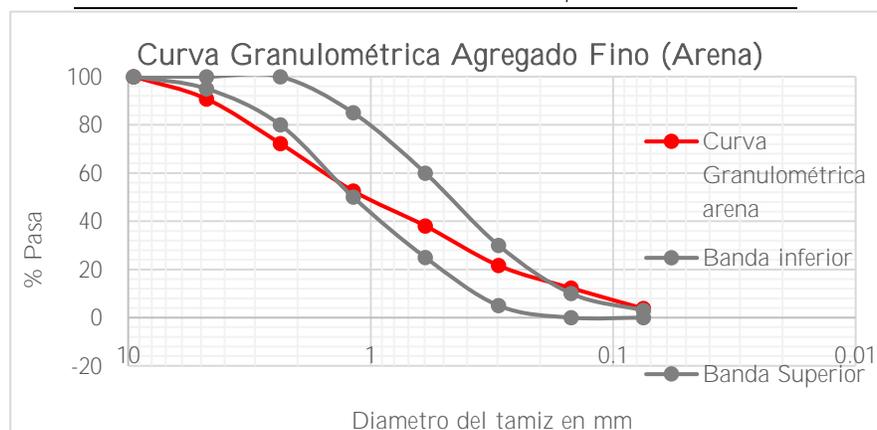


Tabla A-3: Análisis granulométrico de la arena.

Universidad Surcolombiana Facultad de Ingeniería Laboratorio de construcciones		 UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA			
Determinación del contenido total de humedad evaporable por secado de los agregados (NTC 1776, 2019)					
Descripción:		Grava del río Páez (AGN)			
Procedencia:		MASSEQ S.A.S			
No Ensayo	1	2	3	4	5
Peso de recipiente (g)	136,5	706,5	639	640,5	645,5
Muestra húmeda + Recipiente (g)	6333	6767	5733	5953	5274
Muestra húmeda (g)	6196,5	6060,5	5094	5312,5	4628,5
Muestra seca + Recipiente (g)	6256	6684	5660	5880	5210
Muestra seca (g)	6119,5	5977,5	5021	5239,5	4564,5
Contenido de humedad (%)	1,258	1,389	1,454	1,393	1,402
Promedio Contenido de humedad (%)	1,379				

Tabla A-4: Determinación del porcentaje de humedad del AGN.

Universidad Surcolombiana Facultad de Ingeniería Laboratorio de construcciones		 UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA			
Determinación del contenido total de humedad evaporable por secado de los agregados (NTC 1776, 2019)					
Descripción:		Grava reciclada de concreto AGR-C			
Procedencia:		Reciclados industriales			
No Ensayo	1	2	3	4	5
Peso del recipiente (g)	646,4	675,9	637,4	707,5	644,3
Muestra húmeda + Recipiente (g)	5652,6	5586,4	5874,4	5988,8	4811,6
Muestra húmeda (g)	5006,2	4910,5	5237,0	5281,3	4167,3
Muestra seca + Recipiente (g)	5433,5	5374,3	5644,3	5746,8	4623,8
Muestra seca (g)	4787,1	4698,4	5006,9	5039,3	3979,5
Contenido de humedad (%)	4,577	4,514	4,596	4,802	4,719
Promedio Contenido de humedad (%)	4,642				

Tabla A-5: Determinación del porcentaje de humedad del AGR-C.

Universidad Surcolombiana Facultad de Ingeniería Laboratorio de construcciones		 UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA			
Determinación del contenido total de humedad evaporable por secado de los agregados (NTC 1776, 2019)					
Descripción:			Arena triturada		
Procedencia:			MASSEQ S.A.S		
No Ensayo	1	2	3	4	5
Peso del recipiente (g)	89,86	89,57	75,68	87,54	76,05
Muestra húmeda + Recipiente (g)	1289,86	1289,57	1275,68	1287,54	1276,05
Muestra húmeda (g)	1200	1200	1200	1200	1200
Muestra seca + Recipiente (g)	1205,82	1205,94	1193,67	1204,82	1189,7
Muestra seca (g)	1115,96	1116,37	1117,99	1117,28	1113,65
Contenido de humedad (%)	7,531	7,491	7,335	7,404	7,754
Promedio Contenido de humedad (%)	7,503				

Tabla A-6: Determinación del porcentaje de humedad de la arena.

Universidad Surcolombiana Facultad de Ingeniería Laboratorio de construcciones		 UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA	
Densidad Relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado grueso (NTC 176, 2019)			
Descripción:		Grava del río Páez (AGN)	
Procedencia:		MASSEQ S.A.S	
Masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno, g	(A)	3601	
Masa en el aire de la muestra de ensayo sss, g	(B)	3626	
Masa aparente en el agua de la muestra de ensayo saturada, g	(C)	2293	
Cálculos			
Densidad relativa (Gravedad Específica) (SH)/Peso específico, g/cm ³	A/(B-C)	2,701	2,696
Densidad relativa (Gravedad Específica) (SSS)	B/(B-C)	2,720	
Densidad relativa (Gravedad Específica) (Aparente)	A/(A-C)	2,753	
Absorción %	(B-A)/A *100	0,694	

Tabla A-7: Determinación de la densidad y absorción del AGN.

Universidad Surcolombiana Facultad de Ingeniería Laboratorio de construcciones		 UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA	
Densidad Relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado grueso (NTC 176, 2019)			
Descripción:		Grava reciclada del concreto (AGR-C)	
Procedencia:		Reciclados industriales	
Masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno, g	(A)	5063,6	
Masa en el aire de la muestra de ensayo sss, g	(B)	5406,2	
Masa aparente en el agua de la muestra de ensayo saturada, g	(C)	2985	
Cálculos			
Densidad relativa (Gravedad Específica) (SH)/Peso específico, g/cm ³	A/(B-C)	2,091	2,087
Densidad relativa (Gravedad Específica) (SSS)	B/(B-C)	2,233	
Densidad relativa (Gravedad Específica) (Aparente)	A/(A-C)	2,436	
Absorción %	(B-A)/A *100	6,766	

Tabla A-8: Determinación de la densidad y la absorción del AGR-C.

Universidad Surcolombiana Facultad de Ingeniería Laboratorio de construcciones		 UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA	
Densidad Relativa (Gravedad específica) y absorción del agregado fino (NTC 237, 2020)			
Descripción:		Arena del río Páez	
Procedencia:		MASSEQ S.A.S	
Masa del espécimen seco en horno, g	(A)	488,8	
Masa del picnómetro lleno de agua, g	(B)	912,2	
Masa de picnómetro lleno con el espécimen y agua, g	(C)	1220,5	
S Masa del espécimen saturado y superficialmente seco, g	(S)	500	
Cálculos			
Densidad relativa (Gravedad Específica) (SH)/Peso específico, g/cm ³	A/(B+S-C)	2,550	2,545
Densidad relativa (Gravedad Específica) (SSS)	S/(B+S-C)	2,608	
Densidad relativa (Gravedad Específica) (Aparente)	A/(B+A-C)	2,708	
Absorción %	(S-A)/A *100	2,291	

Tabla A-9: Determinación de la densidad y la absorción de la arena.

Universidad Surcolombiana Facultad de Ingeniería Laboratorio de construcciones		 UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA	
Determinación de la densidad volumétrica (Masa Unitaria) y vacíos en agregados (NTC 92, 2019)			
Descripción:		Grava del río Páez (AGN)	
Procedencia:		MASSEQ S.A.S	
Masa del molde Kg: 6,631	Volumen del molde m ³ : 0,003	Densidad del agua (kg/m ³): 998	
No Ensayo	1	2	3
Masa Unitaria Suelta			
Muestra + Molde (Kg)	11,012	11,053	11,080
Masa de la muestra (Kg)	4,381	4,422	4,449
Masa Unitaria Suelta (Kg/m ³)	1437,100	1450,549	1459,406
Promedio (Kg/m ³)	1449,018		
% de Vacíos	47,261		
Masa Unitaria Compacta			
Muestra + Molde (Kg)	11,452	11,396	11,444
Masa de la muestra (Kg)	4,821	4,765	4,813
Masa Unitaria Compacta (Kg/m ³)	1581,433	1563,063	1578,809
Promedio (Kg/m ³)	1574,435		
Descripción:		Grava reciclada del concreto (AGR-C)	
Procedencia:		Reciclados Industriales	
No Ensayo	1	2	3
Masa Unitaria Suelta			
Muestra + Molde (Kg)	10,290	10,260	10,260
Masa de la muestra (Kg)	3,659	3,629	3,629
Masa Unitaria Suelta (Kg/m ³)	1.200,262	1.190,421	1.190,421
Promedio (kg/m ³)	1.193,70		
% de Vacíos	42,807		
Masa Unitaria Compacta			
Muestra + Molde (Kg)	10,640	10,630	10,660
Masa de la muestra (Kg)	4,009	3,999	4,029
Masa Unitaria Compacta (Kg/m ³)	1.315,073	1.311,792	1.321,633
Promedio (Kg/m ³)	1.316,166		

Tabla A-10: Masa unitaria suelta y masa unitaria compacta del AGN y del AGR-C.

Universidad Surcolombiana Facultad de Ingeniería Laboratorio de construcciones		 UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA	
Determinación de la densidad volumétrica (Masa Unitaria) y vacíos en agregados (NTC 92, 2019)			
Descripción:		Arena del río Páez	
Procedencia:		MASSEQ S.A.S	
Masa del molde Kg: 5,217	Volumen del molde m ³ : 0,001	Densidad del agua (kg/m ³): 998	
No Ensayo	1	2	3
Masa Unitaria Suelta			
Muestra + Molde (Kg)	7,356	7,372	7,354
Masa de la muestra (Kg)	2,139	2,155	2,137
Masa Unitaria Suelta (Kg/m ³)	1608,311	1620,342	1606,807
Promedio (Kg/m ³)	1611,82		
% de Vacíos	36,660		
Masa Unitaria Compacta			
Muestra + Molde (Kg)	7,627	7,638	7,636
Masa de la muestra (Kg)	2,410	2,421	2,419
Masa Unitaria Compacta (Kg/m ³)	1812,076	1820,347	1818,843
Promedio (Kg/m ³)	1817,088		

Tabla A-11: Masa unitaria suelta y masa unitaria compacta de la arena.

Universidad Surcolombiana Facultad de Ingeniería Laboratorio de construcciones		 UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA	
Determinar por lavado el material que pasa el tamiz No 200			
Descripción:		Grava del río Páez (AGN)	
Procedencia:		MASSEQ S.A.S	
Porcentaje del material más fino que el tamiz No 200 por lavado	(A)	0,5	
Masa seca original de la muestra, g	(B)	3000	
Masa seca de la muestra después de lavado, g	(C)	2985	
Cálculos			
Porcentaje del material más fino que el tamiz No 200 por lavado A	$[(B-C)/B]*100$		

Tabla A-12: Determinación del material que pasa el tamiz No 200 para el AGN.

Universidad Surcolombiana Facultad de Ingeniería Laboratorio de construcciones		 UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA	
Determinar por lavado el material que pasa el tamiz No 200			
Descripción:		Grava Reciclada del concreto (AGR-C)	
Procedencia:		Reciclados Industriales	
Porcentaje del material más fino que el tamiz No 200 por lavado	(A)		0,23
Masa seca original de la muestra, g	(B)		3000
Masa seca de la muestra después de lavado, g	(C)		2993
Cálculos			
Porcentaje del material más fino que el tamiz No 200 por lavado A			$[(B-C)/B]*100$

Tabla A-13: Determinación del material que pasa el tamiz No 200 para el AGR-C.

Universidad Surcolombiana Facultad de Ingeniería Laboratorio de construcciones		 UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA	
Determinar por lavado el material que pasa el tamiz No 200			
Descripción:		Arena del río Páez	
Procedencia:		Reciclados Industriales	
Porcentaje del material más fino que el tamiz No 200 por lavado	(A)		6,70
Masa seca original de la muestra, g	(B)		500
Masa seca de la muestra después de lavado, g	(C)		466,48
Cálculos			
Porcentaje del material más fino que el tamiz No 200 por lavado A			$[(B-C)/B]*100$

Tabla A-14: Determinación del material que pasa el tamiz No 200 para la arena.

Universidad Surcolombiana Facultad de Ingeniería Laboratorio de construcciones		 UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA	
Clasificación de los componentes de los agregados gruesos reciclados NTC 6422 (2021)			
Proyecto:	Proyecto de grado	Elaboró Diego A. Medina Herrera Edinson Trujillo Cortes	
Descripción:	Grava reciclada		
Fuente:	Reciclados Industriales		
Tamaño de la muestra:	8000 g		
Mo (g)	8000	Mo-M63-M4	
M63 (g)	-		
M4 (g)	-		
M1 (g)	8000		
M2 (g)	7991,8		
M3 (g)	7991,8		
Componente	Masa (g)	Proporciones (%)	Cálculos
x	8,2	0,1025	$100 * M_x / M_1$
Rc	7789	97,3625	$100 * (M_2 / M_1) * (M_{Rc} / M_3)$
Ru	0	0	$100 * (M_2 / M_1) * (M_{Ru} / M_3)$
Rb	202,8	2,535	$100 * (M_2 / M_1) * (M_{Rb} / M_3)$
Ra	0	0	$100 * (M_2 / M_1) * (M_{Ra} / M_3)$
Rg	0	0	$100 * (M_2 / M_1) * (M_{Rg} / M_3)$
	% Total	100	

Tabla A-15: Composición porcentual del AGR-C.

Nota.

M₀ Masa seca de la muestra.

M₆₃ Masa de las partículas retenidas por el tamiz de 63 mm.

M₄ Masa de las partículas que pasan el tamiz de 4,75 mm.

M₁ Masa de la porción de ensayo.

M₂ Masa de las partículas no flotantes restantes.

M₃ Masa de las partículas no flotantes restantes reducida.

Rc Residuos de concreto, de productos de concreto, de mortero y de mampostería de concreto.

Ru Agregados ligados hidráulicamente, no ligados y piedra natural.

Rb Residuos de mampostería, de material cerámico.

Ra Residuos de material asfáltico.

Rg Residuos de vidrio

X Otros (Acero, hierro, aluminio, tubería de PVC, material químico, materia orgánica etc).

B. Anexo: Diseño de mezcla para un concreto de $f'c$ 28MPa por el método ACI 211.1-91

Para el Diseño de mezcla se ha tenido en cuenta las características de los materiales expuestas en la Tabla B-1.

Propiedades físicas	Agregados			Normatividad
	AGN	AGR-C	Arena	
Masa Unitaria Compactada (kg/m ³)	1.574	1.316	1.817	NTC 92
Peso específico (kg/m ³)	2.696	2.087	2.545	NTC 176 – NTC 237
Tamaño Máximo Nominal	3/4"	3/4"	-	NTC 77
Módulo de finura	-	-	3,125	NTC 77
% Absorción (ha)	0,694	6,766	2,291	NTC 176 – NTC 237
% Humedad (h)	0,694	6,766	7,5	NTC 1776
	Cemento Argos			
Densidad ^a kg/m ³	2.937			NTC 221

Tabla B-1: Propiedades de los materiales del concreto.

Nota. ^a Cortes y Perilla (2014). La humedad del AGN y del AGR-C es igual a la absorción, puesto que estos materiales se manejaron en estado saturado superficialmente seco, por la alta absorción del AGR-C.

1. Cálculo de la resistencia promedio a la compresión requerida (f'_{cr}) de acuerdo con la Tabla B-2.

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c < 21$	$f'_{cr} = f'_c + 7,0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8,3$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10f'_c + 5,0$

Tabla B-2: Resistencia promedio a la compresión requerida cuando NO hay datos disponibles para el cálculo de la desviación estándar de la muestra (Tabla 5.3.2.2 ACI 318S-05).

Nota. De *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318SR-05) (Versión en español y en sistema métrico)*, p. 66, por el Comité ACI 318, 2005.

$$f'_{cr} = 28\text{MPa} + 8,3 = 36,3\text{MPa}$$

2. Elección de asentamiento de acuerdo con la Tabla B-3.

En la Tabla B-3 se relaciona el asentamiento con el tipo de estructura a construir, su verificación se realizó siguiendo el procedimiento de la NTC 396 (2018).

Tipos de construcción	Asentamiento. mm	
	Máximo*	Mínimo
Muros de contención y zapatas reforzadas	75	25
Cimientos corridos, caissons y muros de subestructura	75	25
Vigas y muros reforzados	100	25
Columnas para edificios	100	25
Pavimentos y losas	75	25
Concreto masivo	75	25

Tabla B-3: Recomendaciones de asentamiento para varios tipos de construcción (SI)

(Tabla A1.5.3.1 ACI 211.1-91).

Nota. * Para consolidación de concreto diferente a vibración aumentar 25mm, Adaptado de *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*, p. 21, por el Comité ACI 211, 2002.

De la Tabla B-3 se elige un asentamiento de 5mm por estar dentro de todos los rangos para los diferentes tipos de construcción, sin embargo, el valor final del asentamiento es de 7,5 mm por diseñarse para un tipo de consolidación diferente a vibración.

3. Elección del Tamaño Máximo Nominal (TMN)

Los agregados gruesos utilizados en el presente proyecto tienen un tamaño máximo nominal de 3/4" o 19mm.

4. Estimar el contenido de aire y cantidad de agua (W_1) de acuerdo con la Tabla B-4.

Para un concreto con tamaño máximo nominal de 19mm y un asentamiento de 75mm la Tabla B-4 indica un valor para el contenido de agua de 205 kg/m³ y una cantidad de aire aproximada de 2% para concretos sin aire incluido.

Asentamiento, mm	Agua, kg/m ³ para el concreto de agregado de tamaño máximo nominal (mm) indicado							
	9,5	12,5	19	25	38	50	75	150
Concreto sin aire incluido								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	
Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto, %	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Concreto con aire incluido								
25 a 50	108	175	165	160	145	140	135	120
75 a 100	200	190	180	175	160	155	150	135
150 a 175	215	205	190	185	170	165	160	

Tabla B-4: Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y tamaño nominal máximo de agregado (SI) (Tabla A1.5.3.3 ACI 211.1-91).

Nota. Adaptado de *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*, p. 22, por el Comité ACI 211, 2002.

5. Seleccionar relación agua-cemento (a/c) de acuerdo con la Tabla B-5

Resistencia a la compresión a los 28 días, MPa	Relación agua-cemento (a/c), por masa	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
40	0,42	-
35	0,47	0,39
30	0,54	0,45
25	0,61	0,52
20	0,69	0,60
15	0,79	0,70

Tabla B-5: Relación agua-cemento (a/c) y la resistencia a la compresión del concreto (SI) (Tabla A1.5.3.4 (a) ACI 211.1-91).

Nota. Adaptado de *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*, p. 22, por el Comité ACI 211, 2002.

El valor de la relación a/c para f'_{cr} de 36,3 MPa se determinó interpolando los datos de la tabla, obteniendo un valor de $a/c=0,457$.

6. Calcular la cantidad de cemento (C_1) de acuerdo con la Ecuación B.1.

$$C_1 = \frac{a}{a/c} \quad (B.1)$$

$$C_1 = \frac{250kg/m^3}{0,457} = 448,58kg/m^3$$

7. Cálculo del volumen del agregado grueso para un metro cubico de concreto (B) de acuerdo a la Tabla B-6.

Según O. Giraldo (2004), es posible realizar interpolaciones y extrapolaciones para obtener el dato de b/b_0 en casos en los que el valor del modulo de finura no se encuentre en la Tabla B-6, tal como resultó en el presente proyecto.

Tamaño máximo nominal del agregado, mm	Volumen del agregado grueso varillado (Compactado) en seco por volumen unitario de concreto (b/b_0) para diferentes módulos de finura de agregado fino			
	2,40	2,60	2,80	3,00
9,5	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5	0,59	0,57	0,55	0,53
19	0,66	0,64	0,62	0,60
25	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

Tabla B-6: Volumen del agregado grueso por volumen unitario del concreto (Tabla A1.5.3.6 ACI 211.1-91).

Nota. Adaptado de *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*, p. 23, por el Comité ACI 211, 2002.

Por extrapolación para un Tamaño Máximo Nominal de 19mm y un módulo de finura de 3,125 se obtiene un valor de b/b_0 de 0,5875.

Para determinar el volumen del agregado grueso para un metro cubico de concreto (B), el valor de la relación b/b_0 se multiplicó por el valor del volumen del agregado grueso por metro cubico de agregado grueso (b_0') como se expresa en la Ecuación B.3, siendo b_0' la relación entre la masa unitaria compacta del agregado grueso (MUC) y su densidad aparente (d_g), como se expone en la Ecuación B.2.

$$b_0' = \frac{MUC}{d_g} \quad (B.2)$$

$$b_0' = \frac{1.574,4 \text{ kg/m}^3}{2.696 \text{ kg/m}^3} = 0,584$$

$$B = \frac{b}{b_0} * b_0' \quad (B.3)$$

$$B = 0,5875 * 0,584 = 0,3431 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

8. Calcular el volumen del agregado fino.

Se determina el volumen restante para un metro cúbico de concreto teniendo en cuenta el volumen de los demás componentes (Cemento, agua, aire y agregado grueso), ver Tabla B-7.

Componente	Masa (kg/m ³)	Densidad(kg/m ³)	Volumen(m ³ /m ³)
Cemento	447,58	2.937	0,1527
Agua	205	1000	0,2050
Aire	-	-	0,02
Agregado grueso	0,3431	-	0,3431

Tabla B-7: Volumen de los componentes (No incluye el volumen del agregado fino).

$$\text{Volumen del agregado fino} = 1 - (0,1527 + 0,2050 + 0,02 + 0,3431) = 0,2792 \text{ m}^3$$

9. Determinar la masa seca del agregado grueso (G1) y del agregado fino (F1).

Agregado	Volumen (m ³ /m ³) (A)	Densidad (kg/m ³) (B)	Masa seca kg/m ³ (A*B)
Grueso	0,3431	2.696	924,96
Fino	0,2792	2.544,7	710,43

Tabla B-8: Masa seca de los agregados en kg para 1 m³ de concreto.

10. Ajuste por humedad

Se determinó la cantidad de agregado fino en estado húmedo F_h , la cantidad de agregado grueso en estado húmedo G_{h1} y la nueva cantidad de agua de mezclado W_h donde se tuvo en cuenta el porcentaje de humedad de la arena (h_f) y el porcentaje de humedad de la grava (h_g), de acuerdo con la Ecuación B.4, la Ecuación B.5 y la Ecuación B.6 respectivamente.

$$F_h = F_1 * (1 + h_f/100) \quad (B.4)$$

$$F_h = 710,431 \text{ kg} * (1 + 7,5/100) = 763,71 \text{ kg/m}^3$$

$$G_{h1} = G_1 * (1 + h_g/100) \quad (B.5)$$

$$G_{h1} = 924,960 \text{ kg} * (1 + 0,6942/100) = 931,38 \text{ kg/m}^3$$

$$W_h = W_1 + F_1 * (h_{af} - h_f)/100 + G_1 * (h_{ag} - h_g)/100 \quad (B.6)$$

$$W_h = 205 + 710,431 * \frac{(2,2913 - 7,5)}{100} + 924,96 * \frac{(0,6942 - 0,6942)}{100}$$

$$W_h = 167,99 \text{ kg/m}^3$$

Para la Ecuación B.6 W_1 Es la masa del agua para un metro cúbico de concreto obtenida en el paso 4, h_{af} el porcentaje de humedad por absorción del agregado fino y h_{ag} el porcentaje de humedad por absorción del agregado grueso.

11. Diseño de mezcla inicial en estado seco y húmedo para un metro cubico de concreto

Componentes	Peso seco (kg/m ³)	Peso húmedo (kg/m ³)
Cemento	448,58	448,58
Agua	205,00	167,99
Agregado Fino	710,43	763,71
Agregado Grueso	924,96	931,38

Tabla B-9: Diseño de mezcla inicial en kg para 1 m³ de concreto.

La masa unitaria teórica de la mezcla es de 2311,66 kg/m³

12. Primera mezcla de prueba (Revisión del asentamiento y la masa unitaria)

Para evaluar el asentamiento y la masa unitaria de la mezcla, se preparó un volumen aproximado (vs) de 8 litros (0,007854 m³), lo equivalente al volumen de cuatro probetas cilíndricas de 100 mm x 200 mm, las cantidades en masa se pueden ver en la Tabla B-10.

Diseño de mezcla para 4 probetas con 25% de desperdicio		
Componentes	Peso seco (kg)	Peso húmedo (kg)
Cemento	3,5231	3,5231
Agua	1,6101	1,3194
AF	5,5797	5,9982
AG	7,2646	7,315

Tabla B-10: Proporciones para primera mezcla de prueba.

Al medir el asentamiento de esta mezcla no se obtiene el valor especificado (75mm), se obtuvo un asentamiento de 50mm, por lo tanto, para llegar al valor de 75mm se adicionó 210 ml de agua. Además, la masa unitaria real (MU_R) del concreto medida de acuerdo a la NTC 1926 (2013) fue de 2339,29 kg/m³. Con esto se concluyó que la mezcla se debía corregir por asentamiento y masa unitaria.

13. Corrección por asentamiento y masa unitaria

De acuerdo con O. Giraldo (2004), la realización de la corrección por asentamiento y masa unitaria de concreto consiste en determinar nuevas cantidades de los componentes del concreto partiendo del cálculo del rendimiento de la mezcla, para ello se suman las cantidades de los componentes con los que se alcanza el asentamiento requerido y se divide por la masa unitaria real del concreto como se aprecia en la Ecuación B.7.

$$R = (w' + w + c + f + g)/MU_R \quad (B.7)$$

Siendo R el rendimiento de la mezcla, w' la cantidad de agua adicional, w la masa del agua corregida por humedad para un volumen de concreto especificado (v_s), c la masa del cemento para un volumen de concreto especificado, f la masa del agregado fino corregido por humedad para un volumen de concreto especificado, g la masa del agregado grueso corregido por humedad para un volumen de concreto especificado y MU_R la masa unitaria real del concreto.

$$R = (0,21 + 1,3194 + 3,523 + 5,998 + 7,315)/2339,29$$

$$R = 0,007851$$

Determinado el rendimiento de la mezcla de concreto se calculó nuevamente las cantidades de sus componentes para un metro cúbico, como se muestra a continuación:

- La nueva cantidad de agua por metro cubico de concreto se calculó de acuerdo con la Ecuación B.8

$$W_2 = (w' + W_1 * v_s)/R \quad (B.8)$$

$$W_2 = (0,21 + (205 * 0,007854))/0,007851 = 231,83 \text{ kg/m}^3$$

- Con W_2 se calcula nuevamente la cantidad de cemento C_2 , dividiendo W_2 entre la relación a/c inicial.

$$C_2 = (231,83 \text{ kg/m}^3)/0,457 = 507,28 \text{ kg/m}^3$$

- La nueva cantidad del agregado grueso húmedo G_{h2} se calculó de acuerdo con la Ecuación B.9.

$$G_{h2} = (G_{h1} * v_s)/R \quad (B.9)$$

$$G_{h2} = (931,38 * 0,007854)/0,007851 = 931,73 \text{ kg/m}^3$$

A partir de este valor (G_{h2}) se puede calcular la nueva masa del agregado grueso seco G_2 como se representa en la Ecuación B.10. Cabe aclarar que el agregado grueso presenta humedad igual a la absorción, por lo tanto G_{h2} es igual a la masa del agregado grueso en estado saturado superficialmente seco (G_{2SSS}) Ecuación B.11.

$$G_2 = (G_{h2}/(1 + h_g/100)) \quad (B.10)$$

$$G_2 = (931,73/(1 + 0,6942/100)) = 925,31 \text{ kg/m}^3$$

$$G_{2SSS} = G_{h2} \quad (B.11)$$

- Se determinó la masa del agregado fino en condición saturado superficialmente seco (F_{2SSS}) como se muestra en la Ecuación B.12 y con este valor se determinó la masa del agregado fino seco (F_2) de acuerdo con la Ecuación B.13.

$$F_{2SSS} = MU_R - W_2 - C_2 - G_{2SSS} \quad (B.12)$$

$$F_{2SSS} = 2339,29 - 231,83 - 507,28 - 931,73 = 668,45 \text{ kg/m}^3$$

$$F_2 = F_{2SSS}/(1 + h_{af}/100) \quad (B.13)$$

$$F_2 = 668,453/(1 + 2,2913/100) = 653,48 \text{ kg/m}^3$$

14. Diseños finales

Los diseños que se presentan a continuación en la Tabla B.11 y Tabla B.12 se encuentran en masa seca para 1 m³ de concreto. Cabe resaltar que la sustitución de AGN por AGR-C se realizó en volumen y la adición de resina de poliéster en los porcentajes de 1% y 3% se calculó en relación con el peso del cemento.

A continuación, se presenta como ejemplo la determinación de los valores de las cantidades en kg/m³ de AGN y AGR-C para el concreto con 20% de sustitución (CR20%).

- Primero la cantidad de AGN en kg/m³ se convierten a volumen (m³/m³), dividiendo este valor con su densidad respectiva.

$$\text{Volumen de AGN} = \frac{925,31 \text{ kg}}{2696 \text{ kg/m}^3} = 0,343 \text{ m}^3$$

- Segundo se realiza el remplazo de AGN por AGR-C con la cantidad en volumen.

$$\text{Volumen de AGN} = 0,343 \text{ m}^3 * \left(\frac{80}{100}\right) = 0,274 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de AGR} - \text{C} = 0,343 \text{ m}^3 * \left(\frac{20}{100}\right) = 0,069 \text{ m}^3$$

- Tercero cada cantidad resultante en volumen de AGN y AGR-C se multiplica con su densidad respectiva.

$$\text{Masa de AGN} = 0,274 \text{ m}^3 * (2696 \text{ kg/m}^3) = 740,25 \text{ kg}$$

$$\text{Masa de AGR} - \text{C} = 0,069 \text{ m}^3 * (2087 \text{ kg/m}^3) = 143,26 \text{ kg}$$

Componentes	Unidad de medida	Tipos de concretos			
		CT	CR20%	CR50%	CR100%
Cemento	kg/m ³	507,28	507,28	507,28	507,28
Agua	kg/m ³	231,83	231,83	231,83	231,83
AGN	kg/m ³	925,31	740,25	462,65	-
AGR-C	kg/m ³	-	143,26	358,15	716,29
Arena	kg/m ³	653,48	653,48	653,48	653,48
Resina de poliéster	% cemento	-	-	-	-
Relación a/c		0,457	0,457	0,457	0,457

Tabla B-11: Dosificación en masa seca para 1m³ del CT y CR.

Componentes	Tipos de concretos							
	CMP-1%	CMP-3%	CRMP 20%-1%	CRMP 20%-3%	CRMP 50%-1%	CRMP 50%-3%	CRMP 100%-1%	CRMP 100%-3%
Cemento (kg/m ³)	507,28	507,28	507,28	507,28	507,28	507,28	507,28	507,28
Agua (kg/m ³)	231,83	231,83	231,83	231,83	231,83	231,83	231,83	231,83
AGN (kg/m ³)	925,31	925,31	740,25	740,25	462,65	462,65	-	-
AGR-C (kg/m ³)	-	-	143,26	143,26	358,15	358,15	716,29	716,29
Arena (kg/m ³)	653,48	653,48	653,48	653,48	653,48	653,48	653,48	653,48
Resina de poliéster* (%)	1	3	1	3	1	3	1	3
Relación a/c	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457	0,457

Tabla B-12: Dosificación en masa seca para 1m³ de concretos modificados con polímeros.

Nota. * La resina de poliéster se representa como porcentaje en relación con la masa de cemento.

Antes de medir y mezclar los materiales para verificar la resistencia se realizó de nuevo los ajustes por humedad.

C. Anexo: Experimentación previa para el conocimiento y utilización de la resina de poliéster RP-055T

Teniendo en cuenta que todos los tipos de resinas en su gran mayoría son diferentes en su composición y debido a la poca información precisa sobre las cantidades recomendables de resina y de catalizador en mezclas de concreto, se optó por realizar una experimentación previa, cuyo objetivo fue conocer y aprender a manejar la resina RP-055T y descubrir que cantidades de esta y del catalizador eran apropiadas para el presente estudio.

Esta experimentación consistió en fabricar un mortero y adicionarle la resina de poliéster en el proceso de mezclado, con el fin de saber qué efectos generaba la resina en el mortero, y que características presentaba este polímero estando en contacto con los componentes más importantes del concreto (cemento y agua), puesto que en estos compuestos orgánicos (resina de poliéster) la solubilidad es muy baja (Aguado y Salla, 1987). Para ello, se fabricaron cubos de mortero con una mezcla de proporción 1:2, utilizando 250 gramos de cemento, se variaron las cantidades de resina de acuerdo con las recomendaciones del ACI 548.1R-97 (10%-25% por masa de cemento) y del estudio realizado por Mendivil et.al (2017) (1%-9% por masa de cemento), y se variaron los porcentajes de catalizador (Mek-peróxido). La cantidad de catalizador se determina en relación con la cantidad de resina.

Para determinar los porcentajes a utilizar de resina y catalizador en el presente proyecto, se describió el resultado en cada tipo de mortero teniendo en cuenta principalmente la trabajabilidad y el endurecimiento, esta descripción fue producto de lo que se lograba visualizar. De esta manera se descartaron las cantidades desfavorables y se eligieron las más optimas, siendo el 1% y 3 % de adición de resina con 3% de catalizador los porcentajes que presentaron un buen comportamiento.

A continuación, en la siguiente Tabla C-1 se exponen los porcentajes de resina de poliéster y catalizador que se analizaron con las respectivas observaciones.

Resina de poliéster RP-055T (%)	Catalizador (%)	Observaciones	Evidencias fotográficas
20	2	La mezcla de mortero presentó una muy baja trabajabilidad, su apariencia es muy seca y sin cohesión entre partículas. Luego de 24 horas estos morteros modificados presentaron una apariencia húmeda y frágil, puesto que con la presión de los dedos se quebraron y al estar sumergidos en agua durante 24 horas su estructura se dañó por completo. Después de 72 horas sin desmoldarse no presentaron endurecimiento.	 
	3		
	5		
15	2		
	3		
	5		
10	2		
	3		
	5		
7	2	La mezcla presentó mejor trabajabilidad que los anteriores morteros, pero no era ideal, su apariencia era menos seca y se logró visualizar una mezcla más compacta y con cohesión entre partículas. Después de 24 horas presentaron una apariencia humedad y frágil. Luego de 48 horas se visualizaban frágiles, y al entrar en contacto con el agua y estar por 24 horas sumergidos aparecen grietas considerables.	 
	3		
	5		
5	2		
	3		
	5		
4	2		
	3		
	5		

Tabla C-1: Estudio visual del comportamiento de la resina de poliéster en mortero.

Resina de poliéster RP-055T (%)	Catalizador (%)	Observaciones	Evidencias fotográficas
3	2	La mezcla presentó una trabajabilidad normal, su apariencia fue similar a la mezcla del mortero testigo y se logró visualizar cohesión entre partículas. Luego de 24 horas mostró una apariencia frágil y húmeda. Después de 48 horas el mortero presentó una apariencia compacta y al entrar en contacto con el agua y estar sumergido por 14 días presentó un endurecimiento normal.	 
	3		
	5		
1	2	La mezcla presentó una trabajabilidad normal, su apariencia es similar a la mezcla de mortero testigo y se visualizó cohesión entre partículas. Luego de 24 horas se presentó una apariencia compacta muy similar a la del mortero testigo, en las misma 24 horas se sumergió en agua y pasado 14 días, esta muestra un endurecimiento común.	 
	3		
	5		

Tabla C-1: Estudio visual del comportamiento de la resina de poliéster en mortero.

D. Anexo: Resultados de resistencia a la compresión, densidad y absorción de los diferentes tipos de concreto

	Resistencia a la compresión (f'_c) a los 7 días de curado en MPa											
	Tipos de concreto											
	C. Testigo	Concretos reciclados			C. Modificados con polímero		Concretos reciclados modificados con polímero					
# MUESTRAS	CT	CR20%	CR50%	CR100%	CMP-1%	CMP-3%	CRMP 20%-1%	CRMP 20%-3%	CRMP 50%-1%	CRMP 50%-3%	CRMP 100%-1%	CRMP 100%-3%
1	20,09	22,82	23,21	18,22	23,91	19,66	24,24	17,83	22,39	18,93	22,42	16,37
2	19,62	21,20	23,62	19,94	23,29	20,97	25,19	17,53	22,24	19,66	24,30	17,27
3	20,06	21,18	23,67	19,65	23,61	19,81	24,93	18,05	22,63	18,99	21,84	17,03
4	19,91	20,75	23,79	19,84	24,20	20,20	24,15	17,47	22,24	19,51	22,76	17,65
5	20,50	21,81	24,10	19,60	23,33	20,25	25,09	18,28	23,04	20,24	23,45	18,15
6	19,18	23,34	22,37	18,76	23,75	19,82	24,74	17,63	22,48	19,56	22,40	16,75
7	19,70	23,04	22,92	18,89	23,09	19,78	24,24	17,94	22,18	18,70	22,54	17,45
8	21,13	22,13	21,86	19,24	23,65	20,01	25,07	17,68	22,76	19,74	23,84	17,50
9	22,32	22,04	23,00	18,97	23,91	20,22	24,39	17,82	22,55	19,62	23,46	17,58
10	18,61	21,75	24,54	18,96	23,96	20,92	25,15	18,00	22,57	19,78	22,51	17,25
PROMEDIOS	20,11	22,01	23,31	19,21	23,67	20,17	24,72	17,82	22,51	19,47	22,95	17,30

Tabla D-1: Resultados de f'_c de los diferentes tipos de concreto a los 7 días de curado.

# MUESTRAS	Resistencia a la compresión (f'_c) a los 14 días de curado en MPa											
	Tipos de concreto											
	C. Testigo	Concretos reciclados			C. Modificados con polímero		Concretos reciclados modificados con polímero					
	CT	CR20%	CR50%	CR100%	CMP-1%	CMP-3%	CRMP 20%-1%	CRMP 20%-3%	CRMP 50%-1%	CRMP 50%-3%	CRMP 100%-1%	CRMP 100%-3%
1	27,00	26,82	28,97	28,58	30,28	27,18	30,50	25,35	28,66	26,41	29,54	24,12
2	26,62	24,99	28,44	28,35	31,89	28,10	31,30	25,36	26,89	26,97	29,35	24,18
3	24,85	26,83	28,16	29,74	30,49	27,67	29,25	24,12	28,33	26,08	27,90	24,89
4	26,89	27,58	27,91	26,57	29,15	27,76	31,34	24,73	28,47	24,76	29,28	24,77
5	27,27	26,39	27,85	28,42	30,12	27,68	31,76	24,57	27,18	26,39	28,65	23,45
6	25,58	26,25	28,53	28,96	29,84	27,55	30,88	25,14	26,88	26,08	28,16	24,50
7	27,10	24,65	28,84	27,30	29,69	27,45	30,46	24,31	27,37	25,80	28,91	23,68
8	27,13	26,94	28,63	28,34	30,20	27,56	30,57	24,30	28,31	26,59	29,50	23,97
9	26,82	24,98	27,89	26,90	30,61	28,21	31,16	25,09	28,08	26,29	28,38	24,30
10	26,78	26,21	29,31	28,77	31,56	27,65	31,15	25,17	29,16	26,48	29,79	24,96
PROMEDIOS	26,60	26,16	28,45	28,19	30,38	27,68	30,84	24,81	27,93	26,19	28,95	24,28

Tabla D-2: Resultados de f'_c de los diferentes tipos de concreto a los 14 días de curado.

# MUESTRAS	Resistencia a la compresión (f'_c) a los 28 días de curado en MPa											
	Tipos de concreto											
	C. Testigo	Concretos reciclados			C. Modificados con polímero		Concretos reciclados modificados con polímero					
CT	CR20%	CR50%	CR100%	CMP-1%	CMP-3%	CRMP 20%-1%	CRMP 20%-3%	CRMP 50%-1%	CRMP 50%-3%	CRMP 100%-1%	CRMP 100%-3%	
1	29,42	33,84	32,04	33,34	34,85	32,09	32,96	33,31	35,00	32,64	35,68	32,99
2	28,60	32,51	32,15	32,70	33,67	32,52	34,19	32,82	36,19	32,95	33,71	34,05
3	30,31	33,13	32,20	32,96	33,81	32,97	35,04	34,46	34,11	33,96	31,34	33,95
4	29,25	33,37	30,62	31,88	34,26	31,68	34,26	34,59	32,94	32,64	33,66	33,74
5	30,12	33,49	32,88	33,33	33,39	32,55	33,93	33,66	35,30	34,13	32,58	32,44
6	30,53	33,66	33,02	31,94	34,48	31,69	33,73	33,23	35,25	33,10	32,09	33,28
7	28,98	32,51	33,13	31,35	33,41	32,57	33,62	33,78	33,67	32,95	33,46	32,75
8	28,41	33,90	31,87	32,08	33,77	31,94	34,50	33,64	33,82	33,46	31,82	33,80
9	30,37	33,97	30,48	31,87	34,02	32,72	34,22	34,14	34,86	33,76	34,54	33,96
10	30,10	33,51	31,79	32,85	34,36	32,76	34,52	33,80	35,78	33,04	35,08	33,43
PROMEDIOS	29,61	33,39	32,02	32,43	34,00	32,35	34,10	33,74	34,69	33,26	33,40	33,44

Tabla D-3: Resultados de f'_c de los diferentes tipos de concreto a los 28 días de curado.

# MUESTRAS	% De absorción después de inmersión a los 28 días de curado											
	Tipos de concreto											
	C. Testigo	Concretos reciclados			C. Modificados con polímero		Concretos reciclados modificados con polímero					
	CT	CR20%	CR50%	CR100%	CMP-1%	CMP-3%	CRMP 20%-1%	CRMP 20%-3%	CRMP 50%-1%	CRMP 50%-3%	CRMP 100%-1%	CRMP 100%-3%
1	5,618	4,393	6,330	6,273	7,157	6,530	6,758	6,713	6,272	7,710	9,172	9,459
2	5,701	4,837	7,153	9,384	7,099	7,090	6,797	7,557	6,786	7,615	9,137	9,365
3	5,925	4,860	5,818	9,597	6,431	7,418	6,357	7,122	6,339	7,094	8,508	8,628
4	5,327	4,426	5,464	6,311	6,429	7,184	6,406	7,080	5,954	6,567	8,469	8,913
5	5,534	4,407	6,816	8,141	6,450	6,559	7,477	7,253	6,743	6,188	8,248	9,707
6	5,787	4,267	7,024	7,708	7,663	6,705	6,179	8,231	5,588	7,855	7,374	8,475
7	5,362	4,472	5,522	6,135	6,365	6,421	7,038	8,219	6,099	6,993	7,847	8,946
8	6,064	4,923	6,132	8,036	6,719	6,956	6,842	7,253	6,399	6,835	7,616	8,682
9	6,226	4,266	5,970	7,359	6,699	6,998	6,767	7,454	6,371	7,032	7,792	8,720
10	5,640	4,620	5,085	6,539	7,157	6,574	8,157	7,447	7,098	6,596	8,091	9,505
PROMEDIOS	5,718	4,547	6,131	7,548	6,817	6,843	6,878	7,433	6,365	7,049	8,225	9,040

Tabla D-4: Resultados del porcentaje por absorción de los diferentes tipos de concreto.

# MUESTRAS	Densidad aparente a los 28 días de curado en g/cm ³											
	Tipos de concreto											
	C. Testigo	Concretos reciclados			C. Modificados con polímero		Concretos reciclados modificados con polímero					
CT	CR20%	CR50%	CR100%	CMP- 1%	CMP- 3%	CRMP 20%-1%	CRMP 20%-3%	CRMP 50%-1%	CRMP 50%-3%	CRMP 100%-1%	CRMP 100%-3%	
1	2,522	2,450	2,459	2,408	2,490	2,466	2,475	2,463	2,269	2,328	2,312	2,321
2	2,516	2,450	2,505	2,545	2,507	2,498	2,456	2,438	2,307	2,328	2,327	2,333
3	2,484	2,417	2,460	2,532	2,481	2,482	2,459	2,440	2,313	2,335	2,312	2,319
4	2,486	2,413	2,465	2,425	2,472	2,455	2,433	2,467	2,293	2,326	2,332	2,329
5	2,529	2,435	2,512	2,473	2,436	2,466	2,468	2,472	2,314	2,325	2,313	2,366
6	2,470	2,410	2,487	2,472	2,518	2,472	2,425	2,470	2,292	2,351	2,294	2,308
7	2,478	2,414	2,455	2,402	2,474	2,449	2,418	2,466	2,307	2,325	2,311	2,330
8	2,474	2,419	2,504	2,480	2,504	2,489	2,395	2,465	2,312	2,346	2,343	2,295
9	2,497	2,414	2,475	2,435	2,461	2,469	2,394	2,461	2,293	2,334	2,334	2,297
10	2,473	2,418	2,471	2,429	2,446	2,438	2,410	2,433	2,324	2,329	2,346	2,322
PROMEDIOS	2,493	2,424	2,479	2,460	2,479	2,468	2,433	2,457	2,302	2,333	2,323	2,322

Tabla D-5: Resultados de densidad aparente de los diferentes tipos de concreto.

E. Supuestos estadísticos de los residuales del modelo ajustado (normalidad, varianza constante e independencia)

Supuestos estadísticos de los residuales del modelo ajustado para el análisis de la resistencia a la compresión a los 7 días (modelo 1).

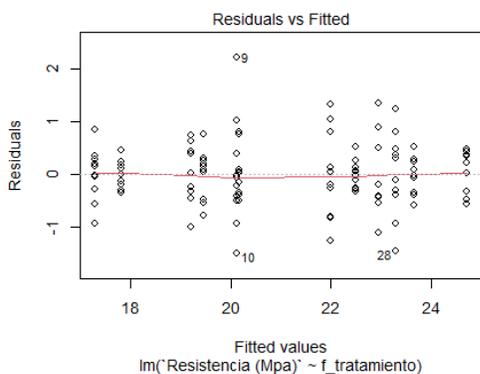


Figura E-1: Gráfico para diagnóstico de linealidad en el modelo 1.

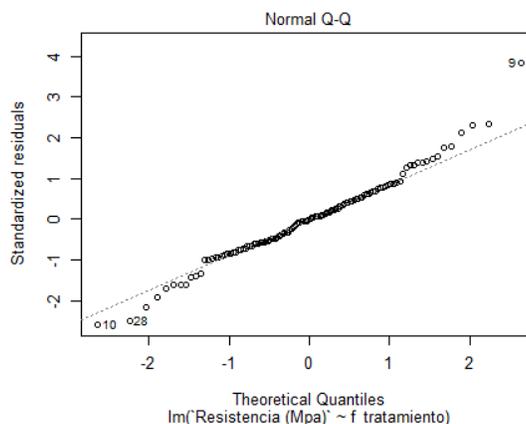


Figura E-2: Gráfico para diagnóstico de normalidad en el modelo 1.

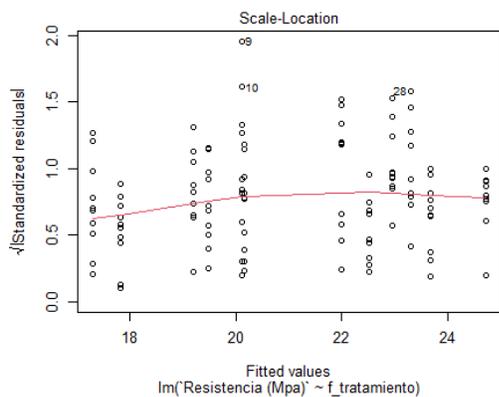


Figura E-3: Gráfico para diagnóstico de varianza constante en el modelo 1.

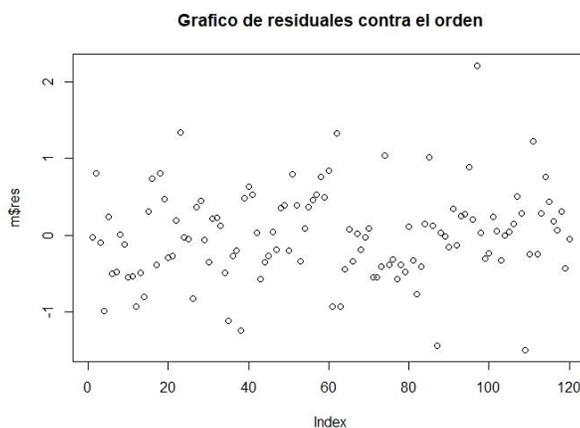


Figura E-4: Gráfico para diagnóstico de independencia en el modelo 1.

Al analizar las gráficas de los diagnósticos, se observa un buen comportamiento, puesto que en las Figuras E-1, E-3 y E-4 no muestran ningún tipo de patrón cumpliendo de esta manera el supuesto de linealidad, varianza constante e independencia de los residuales respectivamente, por otro lado, se aprecia una distribución normal en la Figura E-2.

Supuestos estadísticos de los residuales del modelo ajustado para el análisis de la resistencia a la compresión a los 14 días (modelo 2).

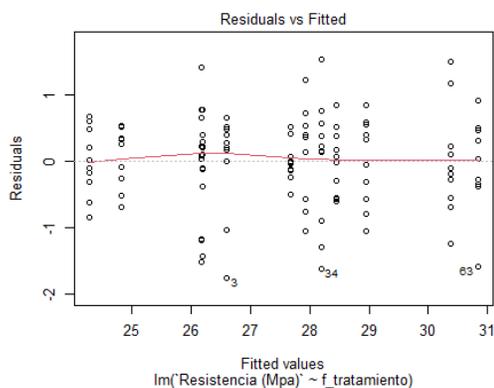


Figura E-5: Gráfico para diagnóstico de linealidad en el modelo 2.

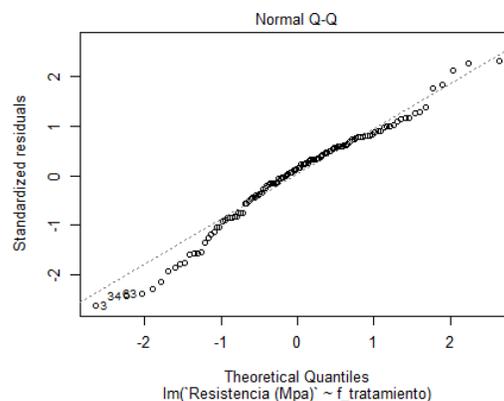


Figura E-6: Gráfico para diagnóstico de normalidad en el modelo 2.

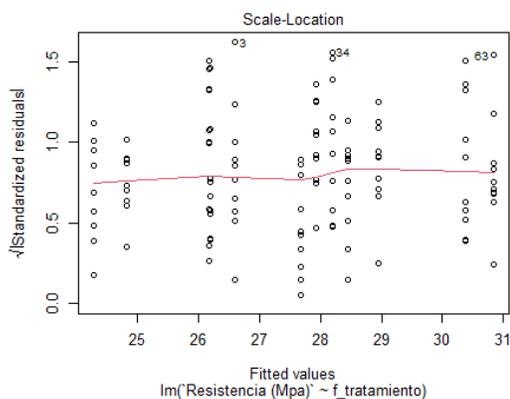


Figura E-7: Gráfico para diagnóstico de varianza constante en el modelo 2.

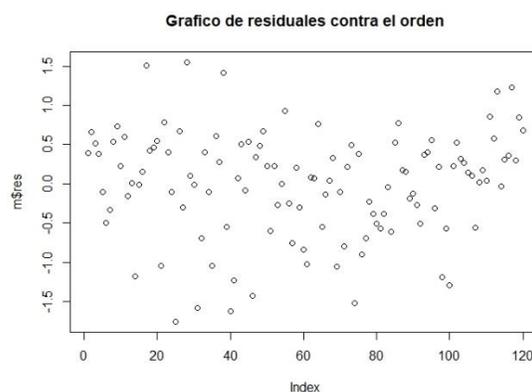


Figura E-8: Gráfico para diagnóstico de independencia en el modelo 2.

En la Figura E-6 se observa que los puntos del gráfico de normalidad de los residuales estandarizados están muy cerca de la línea de referencia. Por otro lado, los diagramas de dispersión expuestos en las Figuras E5, E7 y E8, no muestran una tendencia o algún tipo de patrón. Por estas razones se asume el cumplimiento de los diferentes supuestos de los residuos (linealidad, normalidad, varianza constante e independencia).

Supuestos estadísticos de los residuales del modelo ajustado para el análisis de la resistencia a la compresión a los 28 días (modelo 3).

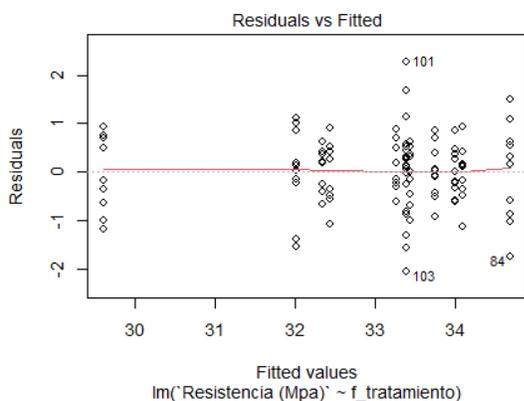


Figura E-9: Gráfico para diagnóstico de linealidad en el modelo 3.

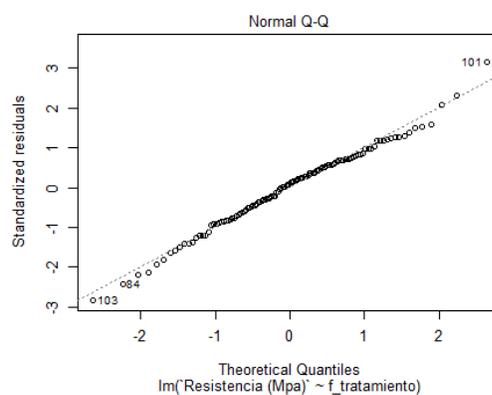


Figura E-10: Gráfico para diagnóstico de normalidad en el modelo 3.

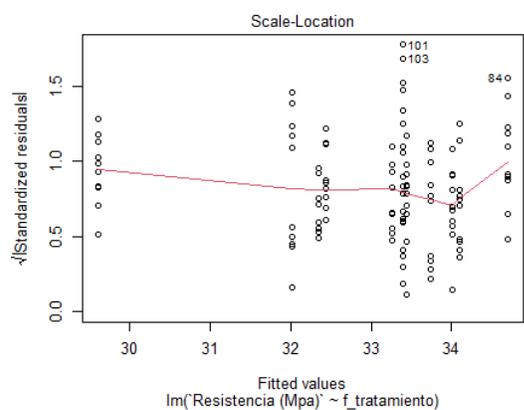


Figura E-11: Gráfico para diagnóstico de varianza constante en el modelo 3.

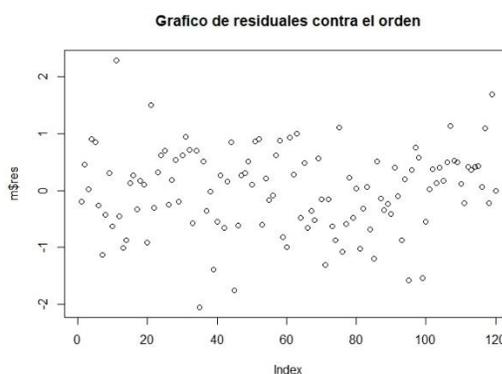


Figura E-12: Gráfico para diagnóstico de independencia en el modelo 3.

Las Figuras E9, E10, E11 y E12 expuestas anteriormente, ratifican el cumplimiento de los diferentes supuestos de los residuales del modelo ajustado (linealidad, normalidad, varianza constante e independencia), por un lado, en la Figura E10 se observa una distribución normal de los residuales estandarizados y por otro, en las Figuras E9, E11 y E12, los diagramas de dispersión expuestos en estas no muestran una tendencia o algún tipo de patrón, de manera que se cumplen los supuestos de linealidad, varianza constante e independencia.

F.Anexo: Estimación de costos de los diferentes tipos de concreto

Materiales	costo en pesos colombianos	Cantidad para 1m ³	CT	CR20%	CR50%	CR100%
Cemento (50kg)	\$27.000	11	\$297.000	\$297.000	\$297.000	\$297.000
AGN (m ³)	\$72.590	0,343	\$24.898	\$19.919	\$12.449	-
AGR-C (m ³)	\$83.300	0,343	-	\$5.714	\$14.286	\$28.572
Arena (m ³)	\$53.550	0,257	\$13.762	\$13.762	\$13.762	\$13.762
Agua (m ³)	\$1.294	0,232	\$300	\$300	\$300	\$300
TOTAL			\$335.961	\$336.696	\$337.798	\$339.634

Tabla F-1: Costo del concreto convencional y los concretos reciclados.

Materiales	\$ Colombia	Cantidad para 1m ³	CMP-1%	CMP-3%	CRMP 20%-1%	CRMP 20%-3%	CRMP 50%-1%	CRMP 50%-3%	CRMP 100%-1%	CRMP 100%-3%
Cemento (50kg)	\$27.000	11	\$297.000	\$297.000	\$297.000	\$297.000	\$297.000	\$297.000	\$297.000	\$297.000
AGN (m ³)	\$72.590	0,343	\$24.898	\$24.898	\$19.919	\$19.919	\$12.449	\$12.449		
AGR-C (m ³)	\$83.300	0,343	-	-	\$5.714	\$5.714	\$14.286	\$14.286	\$28.572	\$28.572
Arena (m ³)	\$53.550	0,257	\$13.762	\$13.762	\$13.762	\$13.762	\$13.762	\$13.762	\$13.762	\$13.762
Agua (m ³)	\$1.294	0,232	\$300	\$300	\$300	\$300	\$300	\$300	\$300	\$300
Resina de poliéster (kg)	\$16.501	1%	\$83.704	-	\$83.704	-	\$83.704	-	\$83.704	-
		3%	-	\$251.112	-	\$251.112	-	\$251.112	-	\$251.112
Catalizador (30cc)	\$4.000	3%	\$20.289	\$60.867	\$20.289	\$60.867	\$20.289	\$60.867	\$20.289	\$60.867
Total			\$439.954	\$647.940	\$440.689	\$648.675	\$441.791	\$649.777	\$443.628	\$651.614

Tabla F-2: Costo de los concretos con adición de resina de poliéster.

De acuerdo con la Tabla F-1 y la Tabla F-2, se puede apreciar que el uso de AGR-C y la adición de resina de poliéster incrementa los costos del concreto. En primer lugar, el precio del AGR-C cotizado es mayor debido a que se adapta a los precios del mercado de su procedencia (Bogotá D.C) siendo esta una localidad distinta a la del proyecto y en segundo lugar el precio de la resina de poliéster y su catalizador es elevado, aunque se utilicen en pequeños porcentajes.

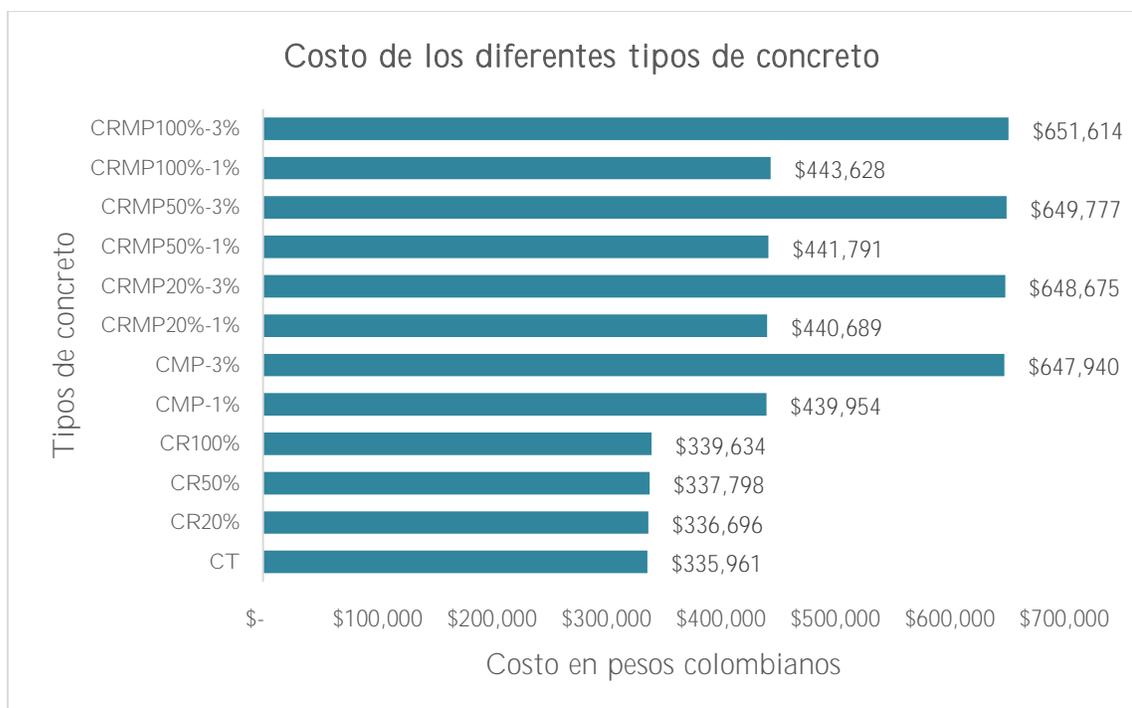


Figura F-1: Variación de costos de los diferentes tipos de concreto.

La Figura F-1 presenta la variación de los costos de los diferentes tipos de concreto, en ella se puede apreciar que el concreto convencional y los concretos reciclados presentan los menores costos, siendo en este caso de estudio el concreto convencional el de menor valor con una diferencia mínima respecto a los concretos reciclados, esto debido a la obtención del agregado grueso, puesto que el agregado natural fue suministrado por una empresa local y el agregado reciclado por una empresa de una región diferente, lo cual influye en la variación de los precios de cada producto.

Por otra parte, los concretos modificados con polímeros presentan los costos más elevados, esto se debe al alto precio de la resina de poliéster, sin importar la cantidad que se adicione al concreto. Sin embargo, de acuerdo con Fowler 1999, estos concretos deberían utilizarse en construcciones que estén expuestos a problemas de durabilidad.

G. Anexo: Fotografías durante la etapa experimental



Figura G-1: Cuarteo de la muestra de AGR-C.



Figura G-2: Materiales listos para la mezcla de concreto.



Figura G-3: Elaboración de muestras cilíndricas.



Figura G-4: Determinación del asentamiento en las mezclas de concreteo.



Figura G-5: Muestras de cilindros de concreto en estado fresco.



Figura G-6: Curado inicial con plástico.



Figura G-7: Curado por inmersión.



Figura G-8: Ensayo a la compresión.



Figura G-9: Especímenes de cilindros fallados.



Figura G-10: Presencia de fibras en el concreto.



Figura G-11: Corte de un cilindro de concreto.



Figura G-12: Marcación de cilindros para cortar.



Figura G-13: Cortes de concreto bajo agua.



Figura G-14: Distribución de los agregados gruesos en el concreto.