

ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE UN
CONCRETO CONVENCIONAL Y MODIFICADO A PARTIR DEL AGREGADO GRUESO
CON 3 TIPOS DE LADRILLOS Y UN RETARDANTE REDUCTOR DE AGUA COMO
ADITIVO



HENRY ALEJANDRO UNDA LADINO
DAVID SANTIAGO POVEDA SÁNCHEZ



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2023

ESTUDIO COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE UN
CONCRETO CONVENCIONAL Y MODIFICADO A PARTIR DEL AGREGADO GRUESO
CON 3 TIPOS DE LADRILLOS Y UN RETARDANTE REDUCTOR DE AGUA COMO
ADITIVO

HENRY ALEJANDRO UNDA LADINO
DAVID SANTIAGO POVEDA SÁNCHEZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título profesional de Ingeniero Civil

Asesor

JULIETH NATALIA GARCÍA SOLANO
Mg Dirección y Gestión de Proyectos

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO

2023

Autoridades Académicas

P. Álvaro José ARANGO RESTREPO, O.P.

Rector General

P. Mauricio Antonio CORTÉS GALLEGO, O.P.

Vicerrector Académico General

P. José Antonio BALAGUERA CEPEDA, O. P.

Rector Seccional Villavicencio

P. Rodrigo GARCIA JARA, O. P.

Vicerrector Académico Seccional Villavicencio

Mg. Julieth Andrea SIERRA TOBÓN

Secretaria de Seccional Villavicencio

Ing. Luis Fernando DÍAZ CRUZ

Decano de la Facultad Ingeniería Civil

Dedicatoria

El presente trabajo investigativo va dedicado principalmente a mi familia, los cuales me han apoyado incansablemente todos los días de mi vida para que yo pueda alcanzar cada uno de los objetivos que me he propuesto. A ustedes mis padres, que me han enseñado casi todo lo que sé, y que se esfuerzan diariamente para que yo y mis hermanos seamos personas integrales, sin ustedes, nada de esto sería posible.

Ustedes, han sido un pilar de fuerza y una guía en mi vida. Gracias por creer en mí incluso cuando dudaba de mí mismo. Su fe en mis capacidades me ha impulsado a superar obstáculos y a alcanzar metas que nunca imaginé posibles.

Hoy, en esta dedicatoria especial, quiero reconocer todo el esfuerzo y amor incondicional que han puesto en mi crianza y desarrollo. Son el corazón de mi existencia y siempre estaré agradecido por su presencia en mi vida. Cada logro que alcanzo lleva su nombre escrito en él, porque sin su amor y apoyo, no estaría donde estoy hoy.

Henry Alejandro Unda Ladino

Queridos padres y allegados, voy a aprovechar este espacio para expresar mi más profundo agradecimiento y dedicarles esta tesis. Su amor, confianza y apoyo han sido el motor que me ha llevado a conseguir este gran logro académico.

A ti, padre, por tanta confianza que me depositaste, por haber sido mi mentor y ser mi ejemplo para seguir, además de haber sido tan buen padre y amarme tanto como lo hiciste. A mi madre y a mi hermana, por tanta paciencia, por confiar en mí a pesar de mi actuar y por ser las excelentes mujeres que son. Agradezco también a mis amigos y compañeros de tesis quienes me acompañaron durante este reto y que fueron parte fundamental en la consecución de este trabajo. Por último, quiero extender mi gratitud a todos mis profesores y profesoras, que formaron parte de mi proceso educativo y que han sido grandes influencias para mí.

Esta tesis es el resultado de un esfuerzo colectivo y de todas las influencias positivas que recibí en mi vida. Gracias por creer en mí y por el apoyo incondicional. Con todo mi cariño y agradecimiento.

David Santiago Poveda Sánchez

Agradecimientos

Quiero expresar mi gratitud a todas aquellas personas que me apoyaron para la consecución de esta tesis. En primer lugar, quiero agradecer a mis compañeros de proyecto Jesús Cárdenas, Julián Ángel, Joseppe Maldonado y Manuela Moreno, que nos apoyaron en gran medida en la realización de los laboratorios, también me gustaría agradecer a la ingeniera Julieth Natalia García que depositó su confianza en nosotros desde el comienzo, y nos acompañó durante todo el proceso con entrega y dedicación. A mi compañero de tesis, Santiago Poveda, el cual, trabajó conmigo codo a codo, y se le midió a sacar adelante este proyecto que parecía perdido.

También, quiero expresar mi profundo agradecimiento a las personas externas a este proyecto que de forma desinteresada nos apoyaron en los momentos que más necesitábamos ayuda, a ti María Camila González, fuiste un apoyo enorme para mí, tienes mi gratitud. A Natalia Ramírez, Paula Castaño, mi hermano Gustavo, y al personal de los laboratorios, gracias por su apoyo.

Henry Alejandro Unda Ladino

Me gustaría aprovechar este espacio para agradecer sinceramente a todas las personas que han contribuido significativamente en mi tesis.

Mi gratitud va en primer lugar a mi directora de tesis, Julieth, por su orientación experta y paciencia constante, al ingeniero Germán Ernesto Chicangana Motón por su valioso apoyo y la oportunidad de aprender de su experiencia. Mis compañeros de clase merecen mi sincero agradecimiento por su colaboración y el ambiente positivo que crearon. A mi familia y allegados les agradezco su apoyo incondicional y amor constante. Además, mi gratitud se extiende al proyecto FODEIN por su financiamiento y recursos esenciales para realizar la tesis. Por último, quiero agradecer al personal de los laboratorios por su valiosa ayuda en momentos clave de la investigación. Mi más sincero agradecimiento a todos ustedes por su colaboración, apoyo y confianza en la culminación de esta tesis. Con profunda gratitud,

David Santiago Poveda Sánchez

Contenido

	Pág.
Resumen	13
Abstract.....	14
Glosario	15
1. Introducción.....	16
2. Formulación del problema.....	17
2.1. Identificación del problema.....	17
2.2. Formulación del problema	18
3. Objetivos	19
3.1. Objetivo general	19
3.2. Objetivos específicos.....	19
4. Justificación.....	20
5. Marco de referencia.....	21
5.1. Marco teórico	21
5.1.1 El concreto	21
5.1.2 El cemento	24
5.1.3 El agua	26
5.1.4 Agregados	28
5.1.5 Aire	31
5.1.6 Aditivos.....	32
5.1.7 Propiedades del concreto fresco.....	34
5.1.8 Fraguado del concreto.....	36
5.1.9 Propiedades del concreto endurecido.....	37
5.1.10 Diseño de mezcla	41
5.1.11 Ensayos de laboratorio del concreto y sus agregados	43
5.1.12 Residuos de construcción y demolición.....	44
5.1.13 Extracción minera	45
5.2. Marco conceptual	48
5.3. Marco geográfico	49

5.4.	Estado del arte	51
5.5.	Marco normativo	55
6.	Metodología.....	56
6.1.	Descripción de etapas y tareas	57
7.	Caracterización de los materiales	60
7.1.	Caracterización inicial.....	60
7.1.1	Agregado grueso y fino.....	60
7.1.2	Cemento	60
7.1.3	Ladrillo triturado.....	61
7.1.4	Aditivo	63
7.2.	Granulometría de los agregados.....	64
7.2.1	Agregado grueso	64
7.2.2	Agregado fino	65
7.3.	Determinación del contenido de humedad de los agregados	67
7.3.1	Contenido de humedad agregado fino	67
7.3.2	Contenido de humedad agregado grueso	67
7.4.	Determinación de la densidad y porcentaje de absorción de los agregados.....	67
7.5.	Determinación de la masa unitaria y vacíos entre partículas de los agregados.....	68
8.	Diseño de mezcla.....	69
8.1.	Datos iniciales	69
8.2.	Selección del asentamiento	69
8.3.	Selección del tamaño máximo del agregado	70
8.4.	Estimación del contenido de aire y la cantidad de agua.....	70
8.5.	Determinación de la resistencia de dosificación	71
8.6.	Selección de la relación agua-cemento	72
8.7.	Cálculo del contenido de cemento	73
8.8.	Cálculo del volumen de agregado	73
8.9.	Cálculo de la masa del agregado	73
8.10.	Cálculo de la masa del agregado grueso y fino	74
8.11.	Relación agua-cemento.....	74

8.11.1	Relación agua cemento concreto convencional	75
8.11.2	Relación agua cemento concreto con reemplazo del 5% del agregado grueso.....	75
8.11.3	Relación agua cemento concreto con reemplazo del 10% del agregado grueso	75
8.11.4	Relación agua cemento concreto con reemplazo del 15% del agregado grueso	76
8.12.	Cantidades de especímenes realizados	76
8.13.	Cantidades de totales de material	76
9.	Análisis de resultados.....	77
9.1.	Ensayo de asentamiento	77
9.2.	Resistencia a la compresión	77
9.2.1	Concreto convencional.....	78
9.2.2	Concreto con ladrillo #4.....	78
9.2.3	Concreto con adoquín	79
9.2.4	Concreto con ladrillo estructural.....	80
9.2.5	Concreto con aditivo	80
9.2.6	Comparación de los mejores resultados para cada tipo de ladrillo.....	81
9.3.	Deformaciones verticales	83
9.3.1	Concreto con ladrillo #4.....	84
9.3.2	Concreto con adoquín	85
9.3.3	Concreto con ladrillo estructural.....	86
9.3.4	Concreto con aditivo.....	87
9.4.	Tipos de falla de los cilindros	88
9.5.	Resistencia a la flexión.....	91
9.5.1	Resistencia a la flexión de los concretos modificados sin aditivo	92
9.5.2	Resistencia a la flexión de los concretos modificados con aditivo	92
	Conclusiones.....	94
	Referencias bibliográficas	96

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Porcentaje aproximado de los constituyentes del concreto, en volumen	22
Tabla 2 Composición química del cemento y composición potencial de sus compuestos	25
Tabla 3 Ensayos sobre el agua de mezclado para concreto	28
Tabla 4 Clasificación de los agregados según su densidad.....	30
Tabla 5 <i>Cantidad aproximada de aire atrapado según el TMN</i>	32
Tabla 6 <i>Clasificación de la Minería a pequeña, mediana y gran escala en etapa de explotación</i>	46
Tabla 7 <i>Volúmenes de explotación de materiales de construcción asociados a pagos de regalías año 2022</i>	47
Tabla 8 <i>Marco normativo</i>	55
Tabla 9 <i>Especificaciones técnicas cemento Argos</i>	60
Tabla 10 <i>Especificaciones técnicas ladrillo número 4</i>	61
Tabla 11 <i>Especificaciones técnicas ladrillo estructural</i>	62
Tabla 12 <i>Especificaciones técnicas ladrillo adoquín para tránsito peatonal y vehicular liviano</i>	63
Tabla 13 <i>Granulometría agregado grueso</i>	64
Tabla 14 <i>Granulometría agregado fino</i>	65
Tabla 15 <i>Contenido de humedad agregado fino</i>	67
Tabla 16 <i>Contenido de humedad agregado grueso</i>	67
Tabla 17 <i>Densidad y porcentaje de absorción de los agregados</i>	68
Tabla 18 <i>Masa unitaria y contenido de vacíos de los agregados</i>	68
Tabla 19 <i>Datos iniciales diseño de mezcla</i>	69
Tabla 20 <i>Asentamiento de diseño</i>	69
Tabla 21 <i>Selección del tamaño máximo del agregado</i>	70
Tabla 22 <i>Estimación del contenido de aire y la cantidad de agua</i>	71
Tabla 23 <i>Resistencia de diseño de la mezcla</i>	71

Tabla 24 <i>Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días y la relación a/c</i>	72
Tabla 25 <i>Relación agua cemento</i>	72
Tabla 26 <i>Contenido de cemento</i>	73
Tabla 27 <i>Volumen de agregado</i>	73
Tabla 28 <i>Densidad promedio del agregado</i>	74
Tabla 29 <i>Masa del agregado</i>	74
Tabla 30 <i>Masa del agregado</i>	74
Tabla 31 <i>Relación agua cemento concreto convencional</i>	75
Tabla 32 <i>Relación agua cemento concreto con reemplazo del 5% del agregado grueso</i>	75
Tabla 33 <i>Relación agua cemento concreto con reemplazo del 10% del agregado grueso</i>	75
Tabla 34 <i>Relación agua cemento concreto con reemplazo del 15% del agregado grueso</i>	76
Tabla 35 <i>Cantidades de cilindros</i>	76
Tabla 36 <i>Cantidades de viguetas</i>	76
Tabla 37 <i>Cantidades totales de material</i>	76
Tabla 38 <i>Asentamientos obtenidos</i>	77
Tabla 39 <i>Deformaciones verticales</i>	83
Tabla 40 <i>Tipos de falla</i>	89

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Esquema de la ubicación del agua en la pasta de cemento hidratado	27
Figura 2 Ejemplo de una buena granulometría de agregados	31
Figura 3 Esquema de la ubicación del agua en la pasta de cemento hidratado	36
Figura 4 Curva típica relación a/c con y sin aire incluido	38
Figura 5 Curva típica relación a/c	39
Figura 6 <i>Curva esfuerzo vs deformación del concreto</i>	39
Figura 7 Ubicación de Villavicencio en el Meta y del Meta en Colombia.....	49
Figura 8 Ubicación de la Universidad Santo Tomás	50
Figura 9 <i>Ubicación de la cantera del río Guayuriba</i>	50
Figura 10 Relación entre la resistencia a la compresión y el porcentaje de reemplazo del agregado fino y grueso.....	53
Figura 11 Metodología de la investigación.....	56
Figura 12 Ladrillo número 4.....	61
Figura 13 Ladrillo estructural	62
Figura 14 Ladrillo adoquín	62
Figura 15 Aditivo Eucon WR 60.....	63
Figura 16 Curva granulométrica agregado grueso.....	65
Figura 17 Curva granulométrica agregado fino.....	66
Figura 18 Resistencia a compresión del concreto convencional	78
Figura 19 Resistencia a compresión del concreto con ladrillo #4	79
Figura 20 Resistencia a compresión del concreto con adoquín	79
Figura 21 Resistencia a compresión del concreto con ladrillo estructural	80
Figura 22 Resistencia a compresión del concreto con aditivo retardante reductor de agua	81
Figura 23 Resistencia a compresión del concreto con ladrillo triturado.....	82
Figura 24 <i>Esfuerzo vs deformación concreto con ladrillo #4</i>	84
Figura 25 <i>Esfuerzo vs deformación concreto con adoquín</i>	85
Figura 26 <i>Esfuerzo vs deformación concreto con ladrillo estructural</i>	86

Figura 27 <i>Esfuerzo vs deformación concreto con aditivo</i>	87
Figura 28 Esquema de los modelos de fractura típicos	88
Figura 29 Tipos de falla de los cilindros.....	90
Figura 30 Tipos de falla de los cilindros según tipo de reemplazo.....	90
Figura 31 Ensayo de flexión	91
Figura 32 Resistencia a la flexión de los concretos modificados sin aditivo	92
Figura 33 Resistencia a la flexión de los concretos modificados con aditivo	93

Resumen

Por medio del presente proyecto, se plantea una alternativa de uso al desecho de ladrillos utilizados comúnmente en una obra, los cuales, son generados a partir de mala manipulación, demolición, entre otros casos. Este material es abundante y representa una amenaza al medio ambiente debido al mal proceso de disposición de los escombros, de igual manera, al utilizar ladrillo triturado como agregado se reduce la utilización de agregados pétreos provenientes de canteras, las cuales generan afectaciones en las cuencas. Por lo tanto, se plantea una solución que utiliza el ladrillo triturado aprovechando las propiedades de resistencia que este posee, generando un aporte en la realización de obras de construcción, con el fin de utilizarlo como agregado en el proceso de elaboración del concreto.

Se utilizaron 3 tipos de ladrillo, #4, adoquín, y ladrillo estructural, en 3 porcentajes diferentes de reemplazo de agregado grueso, 5, 10 y 15%, y se usó un aditivo retardante reductor de agua. A partir de ensayos de laboratorio se realizó la caracterización de los agregados, y se determinó la resistencia a compresión y flexión para cada uno de los concretos modificados con cada uno de los ladrillos y porcentajes, para posteriormente generar comparaciones con los valores de un concreto convencional sin reemplazo del agregado grueso. En el proceso se determinó que el ladrillo estructural presentó los mejores resultados al utilizar el aditivo retardante reductor de agua, por otro lado, el ladrillo #4 obtuvo resultados favorables utilizando un 10% de reemplazo del agregado grueso.

Palabras Clave: Ladrillo, adoquín, aditivo, compresión, concreto, estructural.

Abstract

Through this project, an alternative use to the waste of bricks commonly used in a work is proposed, which are generated from poor handling, demolition, among other cases. This material is abundant and represents a threat to the environment due to the poor disposal process of the rubble, in the same way, when using crushed brick as an aggregate, the use of stone aggregates from quarries is reduced, which generate affectations in the basins. Therefore, a solution that uses crushed brick is proposed, taking advantage of its resistance properties, generating a contribution in the construction works, in order to use it as an aggregate in the concrete production process.

3 types of brick were used, #4, paver, and structural brick, in 3 different percentages of coarse aggregate replacement, 5, 10, and 15%, and a water-reducing retarding admixture was used. From laboratory tests, the characterization of the aggregates was carried out, and the compressive and flexural resistance was determined for each of the concretes modified with each of the bricks and percentages, to later generate comparisons with the values of conventional concrete. without replacement of the coarse aggregate. In the process, it was determined that the structural brick presented the best results when using the water-reducing retarding additive, on the other hand, brick #4 obtained favorable results using a 10% replacement of the coarse aggregate.

Key Words: Brick, paver, additive, compression, concrete, structural.

Glosario

Aditivo: Sustancia agregada al concreto o mortero para modificar o mejorar sus propiedades.

Compresión: Fuerza o carga que actúa sobre un material, comprimiéndolo o reduciendo su volumen. Es el opuesto de la tensión.

Concreto: Material compuesto utilizado en la construcción, que consiste en una mezcla de cemento, agregados (como arena y grava) y agua.

Contracción: Reducción de tamaño o volumen que experimenta un material debido a la pérdida de humedad. Puede ocurrir en el proceso de curado o fraguado de un concreto.

Curado: Proceso de mantener y controlar las condiciones de humedad y temperatura del concreto recién colocado para permitir su fraguado y endurecimiento adecuados. El curado asegura el desarrollo de la resistencia y durabilidad del concreto.

Deformación: Cambio en la forma o dimensiones de un material debido a la aplicación de una carga o fuerza externa.

Elasticidad: Propiedad de un material de recuperar su forma original después de ser deformado por una fuerza externa.

Flexión: Fuerza o carga que actúa sobre un material, provocando que este se curve.

Fraguado: Proceso en el cual un material, como el cemento o el yeso, experimenta un cambio de estado de líquido a sólido, en el cual adquiere resistencia.

Mortero: Mezcla de cemento, arena, agua y, a veces, aditivos, que se utiliza como material de unión en la construcción.

Permeabilidad: Propiedad de un material que permite el paso o la penetración de líquidos o gases a través de él.

RCD (Residuo de Construcción y Demolición): Son los restos o desechos generados en obras de construcción y demolición. Incluyen materiales como concreto, ladrillos, cerámica, madera, entre otros.

1. Introducción

El propósito principal de la ingeniería civil es la transformación del ambiente y los recursos de este para la realización de actividades que mejoren la calidad de vida de las personas, supliendo las necesidades fisiológicas y de seguridad que puedan tener. Sin embargo, este aprovechamiento de recursos genera daños en el entorno, un ejemplo claro de esto es que para la producción de una tonelada de cemento Portland, se produce aproximadamente una tonelada de CO₂ (Monteiro, 2006). En respuesta a esta situación, ha surgido un enfoque hacia el cuidado del medio ambiente para asegurar la sostenibilidad en el tiempo de las obras civiles con el cual aparecen, por ejemplo, la investigación para el uso de materiales alternativos en los concretos, que sean sostenibles o puedan ser reciclados, como lo pueden ser las fibras metálicas, la cascarilla de arroz, los RCDs o incluso los reemplazos del cemento como la escoria de alto horno (ASTM, 2017). Los mencionados RCDs o Residuos de Construcción y Demolición tienen una composición variada, que incluye pétreos como el hormigón, arenas, gravas y ladrillos, productos de excavación, no pétreos como el vidrio y varios metales, y otros cuantos materiales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017) Dentro de esta composición de materiales, los ladrillos han sido ampliamente estudiados para su reutilización, por ejemplo, como parte del agregado grueso del concreto.

La inclusión de este material en las mezclas de concreto posibilita la reducción del uso del agregado grueso convencional que es la grava, lo que permite aliviar las cargas ambientales que genera la explotación de cuencas en busca de estos pétreos, así mismo, se da un aprovechamiento de estos residuos y se consiguen concretos con propiedades equiparables a las de los concretos tradicionales.

Así pues, este proyecto busca evaluar las propiedades que tiene el concreto convencional y las que presenta si este es modificado con tres tipos de ladrillos diferentes y un aditivo reductor de agua, por medio de la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas tanto de los agregados utilizados, como de los especímenes hechos a partir de las diferentes mezclas, logrando ampliar el panorama sobre la inclusión de RCDs como agregados en los concretos.

2. Formulación del problema

2.1. Identificación del problema

En el contexto global se presenta una sobreexplotación de materiales de construcción y un mal uso de ellos. La gran demanda inmobiliaria a la par con el crecimiento poblacional ha acelerado esta problemática (CEPAL, 2016), y han generado un déficit donde se consume más de lo que se puede regenerar (Iberdrola, 2021), en donde, para los agregados gruesos la extracción oscila en cerca de 15 000 millones de toneladas al año (Tošić et al., 2015). Tal sobreexplotación ha generado contaminación y los denominados Residuos de Construcción y Demolición (RCD), llevando a una problemática ambiental (Yan et al., 2010). Esta explotación de materiales para construcción ha dado lugar a una carencia de materias primas como el agregado grueso, que en su lugar ha sido compensada con la utilización de otros agregados, generando el incremento de los precios de estos.

Tal es el caso ocurrido en países como Irán y Bangladesh donde no se consigue agregado grueso y este ha sido reemplazado con materiales como el ladrillo, debido a la dificultad de extraer y resulta inviable económicamente importar agregado grueso de países vecinos (Schwerin et al., 2013). En Colombia este fenómeno no ha sido ajeno, tanto para la explotación de estos materiales como para la escasez de algunas de sus materias primas. La extracción de agregados pétreos en las cuencas hidrográficas del país ha generado con el paso del tiempo tanto problemas ambientales por impacto directo a sus ecosistemas, como cambios en la dinámica fluvial, generando procesos como desbordes de cauces, que dan lugar a inundaciones, avalancha de escombros, u otros fenómenos naturales derivados de esta dinámica fluvial, poniendo en alto riesgo a cultivos y comunidades que habitan en su entorno. Tal ha sido el caso en diferentes cuencas a lo largo del país, como la cuenca media del Río Tunjuelo en el sur de Bogotá. en donde, varias empresas multinacionales han generado afectación en la cuenca debido a la extracción de arenas, conglomerados y gravas, derivando en inundaciones y problemas a cientos de familias en el sector (Barrera Silva, 2015). Asimismo, la afectación por la minería se ha visto reflejado en el río Guabas en el Valle del Cauca por la extracción de oro (Gamboa García, 2015), y más específicamente, en el Río Guatiquía en la ciudad de Villavicencio, en donde, se ha generado una serie alteraciones en la morfología del río, cambios en el cauce, inducción a procesos erosivos, modificaciones en el paisaje y en la vegetación;

todo esto, se presume que es derivado de la extracción de materiales de arrastre por parte de empresas mineras de la ciudad (Betancourt León y Solaque Velasco, 2018).

Es importante mencionar, que la explotación de materiales y acumulación de RCD genera un impacto ambiental y a nivel legislativo, en Colombia hay varias leyes que regulan estos aspectos para la protección del medio ambiente, por ejemplo, el código de minas expedido en la ley 685 del 2001 (Congreso de la República de Colombia, 2001) establece por medio de artículos como el 64 las áreas máximas en corrientes de agua que se pueden trabajar en proyectos de extracción y exploración; también, en el artículo 84 de la misma ley define dentro del programa de trabajos y obras, un plan de obras de recuperación geomorfológica paisajística y forestal del sistema alterado; Por otra parte, en el artículo 204 menciona los medios e instrumentos ambientales para la vigilancia de las labores mineras, que pueden ser los planes de manejo ambiental, licencia ambiental, el estudio de impacto ambiental que define los planes de prevención, mitigación, corrección y compensación de esos impactos, entre otras herramientas.

En conclusión, la sobreexplotación es un problema de origen antrópico ligado a las dinámicas del crecimiento poblacional, a su vez este problema deriva en impactos ambientales, los cuales están presentes a nivel global, a nivel nacional, y a nivel local, los cuales deben ser prevenidos y mitigados como se indica en las diferentes normativas ambientales.

2.2. Formulación del problema

¿Los concretos modificados reemplazando parte del agregado grueso con 3 tipos de ladrillo y un reductor de agua y retardante como aditivo, son equiparables al concreto convencional teniendo en cuenta las diferentes dinámicas constructivas y ambientales actuales?

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Realizar la comparación de las características físico - mecánicas de los concretos modificados con un concreto convencional y un concreto modificado el cual tendrá como parte de agregado grueso tres tipos de ladrillos diferentes, y un retardante reductor de agua como aditivo.

3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la composición física de los agregados y tipos de ladrillos a utilizar.
- Determinar las propiedades físico-mecánicas de los cilindros y viguetas elaborados con el concreto modificado por los tres tipos de ladrillo y con el aditivo
- Determinar el concreto modificado que presente los mejores resultados y compararlo con un concreto convencional, para su uso más apropiado.

4. Justificación

La explotación de los recursos naturales es vital para el desarrollo de las ciudades y de las sociedades contemporáneas, su realización ha llevado a que se perjudiquen los ecosistemas con la actividad minera y con la generación de RCD. En la ingeniería civil, se requieren diferentes materias primas, una de ellas es el concreto, el cual está compuesto por materiales como los agregados pétreos, los cuales, son extraídos principalmente de canteras aledañas a los ríos, generando un impacto directo sobre estos.

En este sentido, la ingeniería como actor transformador debe generar soluciones para contribuir en la mitigación del deterioro ambiental; una de las soluciones es la utilización del ladrillo como reemplazo del agregado grueso. Esa es la razón por la que se lleva a cabo este proyecto, se quiere comparar los resultados obtenidos de las propiedades físico-mecánicas de concretos modificados con tres tipos de ladrillos y utilizando un acelerante reductor de agua, con un concreto convencional, con el fin de sentar las bases para su utilización en proyectos futuros de la construcción, y así mitigar el impacto ambiental generado en las cuencas debido a la extracción de materias primas y el impacto por la generación de RCD.

Este proyecto se centra en un reemplazar un porcentaje del agregado grueso del concreto por ladrillo, pues en Colombia se producen 22.270.338 toneladas de RCD por año en sus 12 principales ciudades para el año 2011, de las cuales el 60,5% son aprovechables para obtener agregados pétreos (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020) aprovechamiento que está estipulado por la resolución 0472 del 2017 sobre el manejo integral de los RCD (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017b); además, se conoce por investigaciones externas que al reemplazar un 10% (Masías Mogollón, 2018) del agregado grueso por ladrillo se obtiene un aumento en la resistencia a la compresión del concreto, y si empiezan a obtener resultados desfavorables si el porcentaje de reemplazo del agregado grueso, es mayor al 30% (Viviana y Rojas, 2012).

En síntesis, la investigación desde la ingeniería civil contribuye a la mitigación de los impactos por la actividad minera, mediante la comparación de los resultados obtenidos en concretos modificados reemplazando parte del agregado grueso.

5. Marco de referencia

5.1. Marco teórico

5.1.1 *El concreto*

El concreto puede ser definido como la mezcla entre un material aglutinante que normalmente es cemento Portland, con agregados pétreos (arena y grava), agua, aire y aditivos, la cual eventualmente se endurece para formar un material compacto, pero que en su estructura es heterogéneo y que luego de su proceso de curado puede soportar grandes esfuerzos de compresión (Abanto Castillo, 2009). Esta piedra artificial se ha convertido en uno de los materiales de construcción más utilizados a nivel global, debido a la versatilidad al obtener sus características físico-mecánicas, además de que, al ser utilizado como elemento estructural, es competente con respecto a materiales como el acero y la madera. (Niño Hernández, 2010)

Como se mencionó, el concreto es la mezcla entre cemento, grava, arena y agua, sin embargo también se pueden realizar otro tipos de mezcla quitando uno que otro agregado y que puede ser utilizada para otros fines, tal es el caso de la pasta la cual es la mezcla entre el cemento y el agua, y el mortero que es la mezcla resultante entre el cemento, agua y arena, la cual se utiliza principalmente en la pega de los ladrillos de mampostería o para recubrir esta misma, esto se conoce como pañete, repello o revoque (Sánchez de Guzmán, 2001). La pasta en la mezcla actúa como un pegante que une los agregados compuestos de grava y arena para convertirlos en una roca sólida, además, la calidad de la pasta y de los agregados es un factor determinante de las propiedades del concreto. Estas propiedades de la pasta se relacionan directamente con la relación agua cemento, ya que entre menor agua se use, es decir entre menor sea la relación agua cemento, mejor es la calidad del concreto, resultando en incrementos en la resistencia y la durabilidad, reduciendo la permeabilidad y la contracción.

La distribución en volumen de la mezcla de concreto puede variar en función del contenido de aire que contenga, esta se puede observar en la Tabla 1:

Tabla 1 Porcentaje aproximado de los constituyentes del concreto, en volumen

Con aire atrapado naturalmente (%)	Componente	Con aire incluido intencionalmente (%)
0.5 a 3		Aire 4 a 8
7 a 15	Pasta o cemento	Cemento 7 a 15
16 a 21		Agua 14 a 18
25 a 30	Agregados	Arena o agregado fino 25 a 30
25 a 50		Grava o agregado fino 30 a 50

Nota. Adaptado de Niño Hernández (2010).

El concreto se puede dividir de tres formas, según el peso unitario que contenga, según su resistencia o según su uso. Monteiro (2006), divide el concreto según su peso unitario en tres categorías:

- **Concreto de peso normal:** Este concreto contiene agregados pétreos cuya densidad es alrededor de 2400 kg/m³, y se utiliza ampliamente por propósitos estructurales.
- **Concreto de peso liviano:** Se usa en casos en los que se requiera una mayor relación resistencia-peso, en donde, las densidades de los agregados tienen valores menores a 1800 kg/m³.
- **Concreto de peso pesado:** Usado para edificaciones que requieran protección contra la radiación y cuya densidad es mayor a 3200 kg/m³.

De igual manera, se puede dividir el concreto de acuerdo con la resistencia que este tenga:

- **Concreto de baja resistencia:** Menos de 20 Mpa (3000 psi).
- **Concreto de moderada resistencia:** Entre 20 y 40 Mpa (3000 a 6000 psi).
- **Concreto de alta resistencia:** Más de 40 Mpa (6000 psi).

Por último, Abanto Castillo (2009) divide el concreto según su uso, los cuales son:

- **Concreto simple:** Es el concreto convencional, cuya mezcla está constituida por cemento Portland, arena, grava y agua.

- **Concreto armado:** Es aquel concreto simple que lleva armaduras de acero como refuerzo, bajo la idea de que ambos componentes trabajen conjuntamente para soportar los esfuerzos de tracción y compresión.
- **Concreto estructural:** Se refiere al concreto simple, que es diseñado, dosificado, transportado y fundido que cumple con unas especificaciones mínimas de diseño.
- **Concreto ciclópeo:** Es concreto simple cuya característica diferenciadora es que lo compone rocas de gran tamaño (máximo 10 pulgadas).
- **Concreto premezclado:** Es el concreto que se dosifica en planta.

El concreto puede estar en 3 estados principalmente, fresco, en proceso de fraguado o endurecido, en donde, sus propiedades van a depender del proceso en el que esté cada una. A nivel general las propiedades del concreto son trabajabilidad, consistencia, segregación, resistencia, durabilidad, impermeabilidad y resistencia a la abrasión (Nawy, 2008).

Son muchas las ventajas que puede tener el concreto en términos de resistencia, economía, y practicidad, Abanto Castillo (2009) enuncia las siguientes; facilidad para colocarse dentro de encofrados de casi cualquier forma, elevada resistencia a esfuerzos de compresión, alta resistencia al fuego y a la permeabilidad, requiere poco mantenimiento, y larga vida de servicio.

Por otro lado, el concreto tiene ciertas desventajas como es su baja resistencia a tracción por lo que requiere la utilización de acero de refuerzo, también, que es necesario utilizar formaletas cuando el concreto está fresco hasta que se endurezca sin perder su forma, así mismo, su baja resistencia por unidad de peso y por unidad de volumen, llevando a la construcción de miembros pesados, así como la variabilidad de las propiedades físico mecánicas del material si no lleva a cabo un correcto proceso de proporción, mezclado, transporte, curado y colocación (Mccormac, 2018).

5.1.2 *El cemento*

El cemento es uno de los materiales más importantes en la construcción debido a su capacidad de unir y dar forma a otros materiales. Según la norma ASTM C219-14 el cemento es un material aglomerante que fragua y se endurece por reacción química con el agua y es capaz de hacerlo bajo el agua (American Society for Testing and Materials, 2014). Ahora bien, existen varios tipos de cemento, con propiedades, usos, componentes y características diferentes, estos cementos están definidos por la ACI 116, a continuación, algunos de los más importantes:

- **Cemento Portland:** Es el tipo de cemento más utilizado en la construcción debido a su versatilidad y propiedades; se define como un “cemento hidráulico que se produce pulverizando Clinker de cemento Portland y que generalmente contiene sulfato de calcio” (ACI, 1991, p.25)
- **Cemento blanco:** Este tipo de cemento es mayormente utilizado con fines arquitectónicos y decorativos, la ACI lo define como un material que al terminar su proceso de hidratación forma una pasta blanca, y que se produce utilizando materiales con bajo contenido de hierro.
- **Cemento modificado:** Se utiliza cuando se requiere una mejoría en propiedades como la resistencia a los sulfatos o el calor de hidratación.
- **Cemento de alta resistencia inicial:** Este cemento se caracteriza por lograr una alta resistencia en los morteros, concretos u hormigones que se preparan a una edad temprana, en comparación con los preparados con cementos normales.
- **Cemento de bajo calor de hidratación:** Este tipo de cemento produce menos calor durante su proceso de hidratación, por lo tanto, se usa en obras que requieran de la construcción en masa.
- **Cemento resistente a los sulfatos:** Se caracteriza por un bajo contenido de aluminato tricálcico, lo que mejora la resistencia del material frente a los sulfatos presentes en el agua o los suelos.

Para la creación de este material se sigue un proceso similar, independientemente del tipo de cemento que sea, y este proceso de producción comienza con la extracción de materias primas

de canteras cercanas a la planta de fabricación. Estos materiales se trituran y se mezclan en proporciones específicas para formar una mezcla cruda que se alimenta a un horno rotativo a altas temperaturas (aproximadamente 1.450 °C) para producir clinker. El clinker es un material duro y granulado que se muele en un molino con pequeñas cantidades de yeso para producir cemento Portland. El proceso de producción del cemento puede variar según el tipo de cemento que se esté fabricando y la tecnología utilizada en la planta de fabricación (Kosmatka y Wilson, 2011).

Como resultado, se obtiene un material con una composición química que varía según el tipo de cemento, pero en general, el cemento Portland, el tipo de cemento más comúnmente utilizado y el que se utilizó para efectos prácticos en este proyecto de grado, está compuesto principalmente por silicatos, aluminatos de calcio y otros elementos. La composición química típica del cemento Portland se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2 *Composición química del cemento y composición potencial de sus compuestos*

	Compuesto	Porcentaje en peso
Composición Química	Óxido de calcio (CaO)	61.5-65.2%
	Óxido de silicio (SiO ₂)	19.0-21.8%
	Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	3.9-6.1%
	Óxido de hierro (Fe ₂ O ₃)	2.0-3.6%
	Óxido de magnesio (MgO)	0.8-4.5%
	Óxido de azufre (SO ₃)	2.0-4.4%
	Óxido de sodio (Na ₂ O)	0.2-1.2%
Composición potencial de los compuestos	Silicato tricálcico (C ₃ S)	45-65%
	Silicato dicálcico (C ₂ S)	6-21%
	Aluminato tricálcico (C ₃ A)	6-12%
	Ferritoaluminato tetracálcico (C ₄ AF)	6-11%

Nota. Adaptado de Kosmatka y Wilson (2011).

También es importante destacar que la producción del cemento tiene un gran impacto ambiental debido a su alto consumo de energía y la emisión de dióxido de carbono (CO₂) en la atmósfera. Como ya se mencionó, la producción de una tonelada de cemento Portland produce

aproximadamente una tonelada de CO₂, lo que representa el 7% de las emisiones mundiales de CO₂ (Monteiro, 2006). Para reducir dicho impacto ambiental, se están investigando alternativas más sostenibles y menos emisoras de carbono, como el uso de cemento con bajo contenido de carbono, donde básicamente se busca mejorar la eficiencia productiva, utilizar recursos alternativos menos contaminantes y cambiar los productos fabricados (Perera y Dionisio, 2016); y el concreto de geopolímero, que es un tipo de concreto que se produce a partir de materiales no tradicionales, como ceniza volante y soluciones alcalinas, y tiene una menor huella de carbono en comparación con el cemento Portland convencional (Lloyd y Rangan, 2010).

En conclusión, el cemento es un material vital en la construcción debido a su capacidad de unir y dar forma a otros materiales. Sin embargo, su producción tiene un gran impacto ambiental debido a la emisión de CO₂ en la atmósfera. Se están investigando alternativas más sostenibles y menos emisoras de carbono, como el cemento con bajo contenido de carbono y el cemento de geopolímero.

5.1.3 El agua

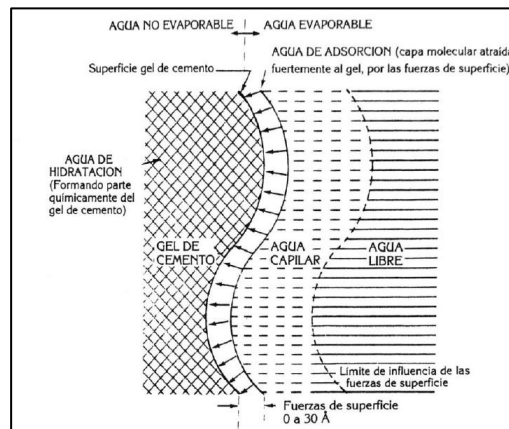
El agua se puede definir como aquel componente del concreto en virtud del cual el cemento experimenta reacciones químicas que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados (Sánchez de Guzmán, 2001), éste es uno de los componentes activos más importantes en la elaboración de concreto y mortero, debido a que desempeña una función vital en el estado fresco, de fraguado y endurecido (Niño Hernández, 2010). Cumple funciones importantes en la mezcla y su participación está dada en tres procesos diferentes como son el mezclado, curado y lavado de agregados, en donde, tanto la calidad como la cantidad son factores importantes para tener en cuenta en el uso y selección del agua para la mezcla (Matallana Rodríguez, 2019), los cuales son relevantes al estar fuertemente relacionados con la resistencia, trabajabilidad y demás propiedades del concreto endurecido (Abanto Castillo, 2009).

El agua en la mezcla de concreto puede ser de dos tipos, agua de mezclado y agua de curado. Sánchez de Guzmán (2001) define el agua de mezclado como “la cantidad de agua por volumen unitario de concreto que requiere el cemento, contenido en ese volumen unitario, para producir una pasta hidratada, con una fluidez tal, que permita una lubricación adecuada de los agregados” (p. 57), en donde esta se adiciona junto con los agregados y el cemento, y produce el gel de cemento

(Niño Hernández, 2010). Se dice que el agua de mezclado es alrededor del 15% del volumen de concreto, y cumple dos funciones principales; hidratar el cemento para desarrollar propiedades aglutinantes y en estado fresco, proporcionar fluidez a la mezcla (Matallana Rodríguez, 2019).

El agua de mezclado se encuentra en dos estados en la mezcla, como agua evaporable y como agua no evaporable. El agua no evaporable o también llamada agua de hidratación reacciona químicamente con el cemento, formando compuestos químicos y quedando incorporada en la mezcla de concreto (Matallana Rodríguez, 2019), esta pasa a formar parte de la fase sólida del gel de cemento, y en la pasta hidratada se conserva a 0 % de humedad del ambiente y 110 °C de temperatura (Sánchez de Guzmán, 2001). Por otra parte, el agua evaporable puede ser de 3 tipos, agua de adsorción, agua capilar y agua libre. El agua de adsorción es una capa molecular de agua que se encuentra adherida en la superficie del gel de cemento por fuerzas intermoleculares de atracción, el agua capilar, como su nombre lo indica, se encuentra en los poros de la pasta y se encuentra débilmente sujeta a las fuerzas de atracción, y por último está el agua libre que se encuentra fuera de la influencia de las fuerzas de superficie y tiene completa movilidad (Sánchez de Guzmán, 2001). Lo anteriormente mencionado se muestra en la Figura 1:

Figura 1 Esquema de la ubicación del agua en la pasta de cemento hidratado



Nota. Adaptado de Sánchez de Guzmán (2001).

Como ya se mencionó, la cantidad de agua tiene que ser estrictamente controlada ya que parte del agua de mezclado va a ser fija (agua de hidratación) la otra parte se va a evaporar, en donde ésta, va a influir directamente en la porosidad, debido a que con el tiempo el agua libre va dejando pequeños conductos en el concreto endurecido (Niño Hernández, 2010), dando paso a

líquidos, vapores y gases, favoreciendo la formación de microgrietas y la corrosión del acero de refuerzo (Matallana Rodríguez, 2019). Por otro lado, el agua de curado constituye el suministro adicional de agua para hidratar el cemento, y llevar al concreto a alcanzar sus propiedades idóneas (Sánchez de Guzmán, 2001).

La calidad del agua se mide mediante ensayos de parámetros físicos y químicos, como la acidez, alcalinidad, calcio, magnesio, cloruros, dureza, sólidos disueltos, pH, sulfatos y turbiedad. Estos parámetros son descritos por diferentes normativas como la ASTM y NTC, los cuales se muestran en la tabla:

Tabla 3 *Ensayos sobre el agua de mezclado para concreto*

Tema	Norma NTC	Norma ASTM
Agua para la elaboración de concreto y mortero de cemento hidráulico	3459	-
Acidez y alcalinidad	-	D1067
Calcio y magnesio	-	D511
Cloruros	1623	D512
Definición de términos relativos de agua	-	D1129
Dureza	1604	-
Sólidos disueltos	-	D1888
pH	-	D1293
Sulfatos	1603	D516
Turbiedad	881	-

Nota. Adaptado de Niño Hernández (2010).

5.1.4 Agregados

La NSR 10, en el Capítulo C.1-Requisitos Generales, define los agregados como materiales granulares, como arena o grava empleados con un medio cementante para formar concreto o morteros hidráulicos (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2010). Los agregados

representan aproximadamente el 60-80% del volumen del concreto (Kosmatka y Wilson, 2011). Los agregados se pueden clasificar según su origen o procedencia, según su tamaño y su densidad. Según el tamaño del agregado podemos definir dos tipos de agregados, los finos y gruesos; a continuación, se definen algunas características claves de ellos:

- **Agregados finos:** Según la ACI los agregados finos son aquellos que atraviesan el tamiz de 9,5 mm, pasan por el tamiz de 4,75 mm y son predominantemente retenidos en el tamiz de malla de 75 micrones (American Concrete Institute, 1991). Los agregados finos se clasifican según su tamaño en: arena gruesa, con tamaños de 2,36 mm hasta 4,75 mm; arena media, con tamaños desde 0,42 mm hasta 2,36 mm, y por la arena fina, con tamaños de 0,074 mm hasta 0,42 mm (Matallana Rodríguez, 2019).
- **Agregados gruesos:** Los agregados gruesos son aquellos que quedan retenidos en el tamiz de malla de 4,75 mm y pueden llegar a tener tamaños de hasta 50 mm, a excepción del concreto en masa o ciclópeo que puede tener tamaños de partícula de hasta 150 mm o mayores (Monteiro, 2006). Los agregados gruesos están a su vez conformados por: piedra, con tamaños de 50,8 mm hasta 300 mm; grava, con tamaños desde 19 mm hasta 50 mm, y por gravilla, con tamaños de 4,75 mm hasta 19 mm (Matallana Rodríguez, 2019).

Según su lugar de procedencia, encontramos nuevamente dos tipos de agregados, los de origen natural y los de origen artificial. Los agregados de origen natural son aquellos que proceden de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias; que son producto de la erosión y del transporte del agua, dando origen a partículas de piedra, a gravas, arenas, limos y arcillas; este tipo de rocas se pueden obtener extrayéndolas directamente de ríos y debe pasar por procesos de lavado para eliminar impurezas presentes, y de triturado para obtener una mejor distribución granulométrica; también, los finos como la arena se pueden obtener de desiertos y playas, teniendo en cuenta que estos tienen sales presentes y pueden tener una muy alta finura, lo que indica una mayor demanda de agua y cemento (Matallana Rodríguez, 2019). De igual manera, los agregados pueden clasificarse según su densidad, la Tabla 4 muestra esta clasificación.

Tabla 4 Clasificación de los agregados según su densidad

Clasificación del agregado	Densidad (kg/m^3)		Algunos materiales que lo componen	Algunos usos
	Agregado	Concreto		
Liviano	880 a 1120	1440 a 1840	Escorias de horno, perlita, pizarras	Concretos estructurales, rellenos de bajo peso, en aislamiento de ruido o calor
Normal	1120 a 3300	2000 a 2600	Grava y arena	Concretos estructurales de peso normal
Pesado	Mayor a 3300	Mayor a 2600	Barita, hierro, limonita, limadura de hierro	Anclajes, refugios antiaéreos

Nota. Adaptado de Matallana Rodríguez (2019).

También es importante definir la granulometría, que define la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados. Esta característica es importante para la economía, manejabilidad, resistencia y durabilidad de una mezcla. Una buena granulometría de un concreto o mortero es aquella donde hay partículas de agregado de todos los tamaños, siendo que, los espacios dejados por las partículas más grandes son ocupados por otras partículas de menor tamaño, de manera sucesiva para todos los tamaños; con esto, se disminuye la cantidad de pasta cemento necesario para una mezcla, lo que mejora la economía, también, el tener un mínimo de vacíos se traduce en una mayor resistencia y menor permeabilidad, lo que mejora la durabilidad. En conclusión, la granulometría es una de las características más importantes en un buen concreto (Matallana Rodríguez, 2019).

Figura 2 Ejemplo de una buena granulometría de agregados



Nota. Adaptado de Matallana Rodríguez (2019).

Además, existen otros tipos de agregados, como los agregados reactivos y los agregados reciclados. Los agregados reactivos son aquellos que pueden reaccionar químicamente con los productos en el proceso de hidratación provocando daños en la estructura del cemento; Los agregados reciclados son aquellos que se obtienen a partir de materiales de construcción reciclados, como puede ser el hormigón y se utilizan para reducir los residuos y el impacto ambiental (American Concrete Institute, 1991).

5.1.5 Aire

El aire es uno de los componentes de la mezcla de concreto que puede beneficiar o perjudicar el comportamiento de la mezcla, en donde el aire puede ser incorporado de forma accidental (atrapado) o intencional (incluido). El aire atrapado, solo aporta propiedades indeseables en la mezcla, ya que disminuye la densidad y la resistencia a los esfuerzos mecánicos del concreto, además de que aumenta la permeabilidad, favoreciendo la entrada de líquidos, gases y otros agentes que pueden perjudicar el concreto (Matallana Rodríguez, 2019). A manera experimental el ACI ha podido determinar que el porcentaje promedio aproximado de aire atrapado en la mezcla es inversamente proporcional al Tamaño Máximo Nominal (TMN) del agregado, esto se dilucida en la Tabla 5:

Tabla 5 Cantidad aproximada de aire atrapado según el TMN

TMN		Porcentaje promedio aproximado de aire atrapado (%)
Pulgadas	mm	
3/8	9.5	2.7
1/2	12.5	2.5
3/4	19	2.0
1	25	1.7
1 ½	37.5	1.5
2	50	1.0
3	75	0.3
6	150	0.2

Nota. Adaptado de Sandino (1981).

Matallana Rodríguez (2019), define el aire incorporado como la “inclusión de forma intencional al concreto, durante el proceso de mezclado, pequeñas burbujas en forma de esferas de aproximadamente 1 mm de diámetro” (p. 92), con el fin de influir de forma positiva en las propiedades de manejabilidad, resistencia, cohesividad, y durabilidad. La inclusión de aire puede disminuir la segregación, la exudación, aumentar la resistencia al fenómeno de congelamiento – deshielo, ataques de sulfatos y a la reducción del efecto de la reactividad Alkali – Sílice (RAS) (Matallana Rodríguez, 2019).

5.1.6 Aditivos

Los aditivos son “materiales distintos al agua, de los agregados o del cemento hidráulico, utilizado como componente del concreto, y que se añade a este antes o después de su mezclado para modificar sus propiedades” (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS, 2010, p.25). Los aditivos se clasifican comúnmente en seis categorías: aceleradores, retardadores, plastificantes o reductores de agua, aireantes y otros aditivos especiales. Mamlouk y Zaniewski (2011), dan las siguientes definiciones:

- **Plastificantes:** Son aditivos que se utilizan para reducir la cantidad de agua necesaria para la mezcla de concreto, estos mejoran la trabajabilidad del concreto fresco sin tener que añadir más agua que la necesaria para la hidratación, pues el exceso de agua representa un detrimento en sus propiedades deseables. Estos aditivos se pueden clasificar según su efectividad, en plastificantes de bajo, medio y alto rango. Los plastificantes también mejoran la resistencia a la compresión, al reducir la cantidad de agua y mantener constante la cantidad de cemento, y reducen la contracción por secado del concreto.
- **Controladores de hidratación:** Estos aditivos tienen la capacidad de parar y de reactivar el proceso de hidratación de un concreto. Lo componen dos partes, un estabilizador que puede detener la hidratación por hasta 72 horas y un activador que restablece el proceso.
- **Aireantes:** Son aditivos que se utilizan mayoritariamente en lugares con temperaturas muy bajas, para incorporar pequeñas burbujas de aire en la mezcla de concreto y dar espacio al agua para que pueda expandirse al congelarse. Esto es necesario para evitar el desarrollo de tensiones internas en el concreto, debido a la expansión del agua congelada, la presión hidráulica y la presión osmótica, y a la repetición de los ciclos de hielo y deshielo del agua en el concreto; también mejora la resistencia a sales, sulfatos y a la reacción álcalis-sílice. Este aditivo también reduce la resistencia del concreto, lo que se puede contrarrestar disminuyendo la relación agua cemento.

Por su parte Niño Hernández (2010), da las siguientes definiciones:

- **Aceleradores:** Los aceleradores son materiales que se adicionan al concreto con el propósito de reducir el tiempo de fraguado y acelerar el desarrollo de resistencias a edades tempranas. Estos aditivos suelen estar hechos de cloruro de calcio, pero no se recomienda para concretos con algún tipo de refuerzo, pues sus componentes pueden promover la corrosión.
- **Retardadores:** Estos aditivos se utilizan para compensar la aceleración en el fraguado que ocasionan las altas temperaturas, para que el concreto sea trabajable mientras es usado. Estos aditivos están compuestos principalmente por azúcares, que en dosis pequeñas ayuda a retardar la velocidad de fraguado. Otro efecto de estos aditivos es la reducción de las resistencias a edad temprana del concreto.

5.1.7 Propiedades del concreto fresco

El concreto en su estado fresco debe cumplir una serie de propiedades que garanticen el adecuado llenado de los moldes, y los espacios del acero de refuerzo, así como tener una masa homogénea sin grandes burbujas de aire atrapadas. Muchas de estas propiedades no pueden ser medidas directamente en su estado fresco, sin embargo, debe asegurarse un correcto control de calidad para que la elaboración del concreto se realice de la mejor manera posible. Algunas de estas propiedades son: Trabajabilidad, consistencia, segregación, exudación, masa unitaria, contenido de aire, y contenido de agua (Niño Hernández, 2010).

Trabajabilidad. Matallana Rodríguez (2019), la define como el “grado de facilidad con el que el concreto puede ser mezclado, transportado, colocado, compactado y terminado, sin que pierda su homogeneidad” (p. 107), en donde esta propiedad está estrictamente relacionada con la compacidad, cohesividad, plasticidad y la consistencia (Niño Hernández, 2010). Esta característica todavía no puede ser medible ya que depende de muchos aspectos, sin embargo, por lo general se relaciona el término trabajabilidad con la consistencia del concreto, que sí se puede medir mediante diferentes métodos.

Consistencia. Esta propiedad del concreto fresco se refiere a su estado de fluidez la cual está ligada con el grado de humedecimiento de la mezcla, que depende de la cantidad de agua usada (Abanto Castillo, 2009). La consistencia se puede medir por diferentes métodos, la más conocida y sencilla, es la prueba de asentamiento, o slump test, que determina la distancia en la que el concreto se desplazó de forma vertical, luego de haber compactado la mezcla en un cono de acero galvanizado (Sánchez de Guzmán, 2001). También existen otros métodos para medir la consistencia como es el Slump Flow para mezclas fluidas, el ensayo de caja en L, el ensayo del anillo, ensayo de Vebe para mezclas secas, y la prueba de la esfera de Kelly (Matallana Rodríguez, 2019).

Segregación. Es la tendencia de separación de las partículas gruesas del mortero por falta de cohesividad, además por diferencia de densidades entre sus componentes, tamaño, forma de las partículas e incluso por su granulometría, esto también puede darse por un incorrecto proceso de transporte, colocación o un exceso de vibración (Niño Hernández, 2010).

Exudación. Abanto Castillo (2009), la define como “el ascenso de una parte del agua de la mezcla hacia la superficie como consecuencia de la sedimentación de los sólidos” (p. 54), fenómeno que se da luego del colocado del encofrado y que se pueda dar por una indebida dosificación de la mezcla, exceso de agua, aditivos o por la temperatura. Se puede medir mediante los procedimientos descritos en la ASTM C232 (Matallana Rodríguez, 2019).

Masa unitaria. Esta propiedad es aquella que depende de la densidad, granulometría y tamaño máximo de los agregados, así mismo por la cantidad de aire atrapado; esta propiedad se puede medir mediante el ensayo de rendimiento volumétrico dado en la NTC 1926 (Niño Hernández, 2010).

Contenido de aire. Como se mencionó anteriormente en el apartado 5.1.5, el aire puede ser introducido de forma accidental o de forma intencional. Algunos ensayos para determinar el contenido de aire son los de presión (NTC 1028 y ASTM C173), gravimétrico (NTC 1926) y volumétrico (NTC 1032 y ASTM C231) (Niño Hernández, 2010).

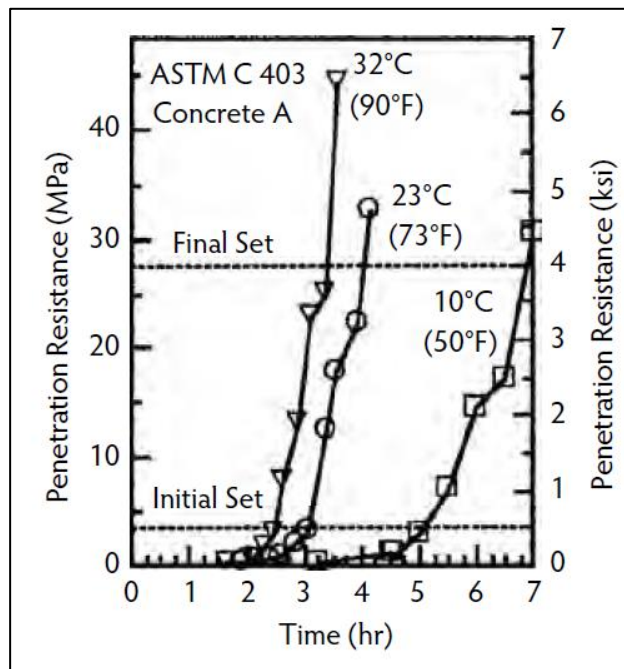
Contenido de agua. Esta es una de las propiedades más importantes ya que se relacionan con la mayoría de las anteriores, dado que, sin un contenido de agua óptimo, las propiedades del concreto endurecido pueden verse afectadas como, la resistencia, durabilidad, porosidad, entre otras, por eso debe realizarse un estricto control de la dosificación y tener en cuenta otros factores como la temperatura, humedad, y el porcentaje de humedad de los agregados (Niño Hernández, 2010).

5.1.8 *Fraguado del concreto*

Se define como el proceso en el que “el concreto pasa de un estado plástico, donde se deforma indefinidamente por la aplicación de carga, a uno en que se comporta de manera elástica ante la acción de la misma” (Niño Hernández, 2010, p. 115), este también se puede definir como el primer paso de solidificación de una mezcla de concreto fresco (Matallana Rodríguez, 2019). Esta propiedad se puede medir mediante dos ensayos, el de tiempo de fraguado y el de contracción plástica. Se han establecido unos tiempos de fraguado inicial y final, en donde, se ha definido que el tiempo de fraguado inicial, es aquel en el que la resistencia a la penetración es alrededor de 3.5 MPa, y el tiempo final con una penetración de 28 MPa. Estos tiempos pueden verse afectados por la acción de la temperatura, dado que un incremento en la temperatura puede disminuir el tiempo de fraguado, aumentar la resistencia a temprana edad, pero disminuir la resistencia después de los 7 días, debido a que los granos de cemento se hidratan de forma superficial, pero forman una estructura más porosa y pobre (Nawy, 2008). A continuación, en la

Figura 3 se muestra el efecto de la temperatura en los tiempos de fraguado:

Figura 3 Esquema de la ubicación del agua en la pasta de cemento hidratado



Nota. Adaptado de Nawy (2008).

5.1.9 *Propiedades del concreto endurecido*

El concreto luego de pasar por un proceso de fraguado, experimenta una serie de procesos fisicoquímicos que hacen que este se endurezca y pase de un estado plástico a uno sólido, procesos que determinan las propiedades más importantes del concreto, tales como la resistencia, durabilidad, masa unitaria, entre otras.

Resistencia. Es la habilidad de resistir esfuerzos, ya sean a compresión, tracción, flexión o corte, esta es la propiedad más importante del concreto, ya que el concreto soporta grandes esfuerzos a compresión, sin embargo, no tiene buen comportamiento a tracción (Niño Hernández, 2010). Mediante la compresión se pueden medir otros parámetros como la resistencia a tracción, módulo de elasticidad, resistencia de corte, relación de Poisson, entre otras (Sánchez de Guzmán, 2001). Generalmente se considera que un concreto tiene una resistencia normal cuando supera los 21 MPa pero no los 42 MPa, a partir de este número, el concreto es de alta resistencia.

No se puede hablar de resistencia del concreto sin hablar de uno de los factores que más influyen en ella como es la relación agua/cemento (a/c), la cual fue demostrada por el investigador norteamericano Duff Adams en el año 1918, determinando que “para un concreto perfectamente compactado, empleando materiales con las mismas características y condiciones de ensayo, la resistencia, a una edad dada, es inversamente proporcional a la relación agua/cemento” (Niño Hernández, 2010, p. 120). Está dada por la siguiente forma:

Ecuación 1 *Relación agua cemento y la resistencia*

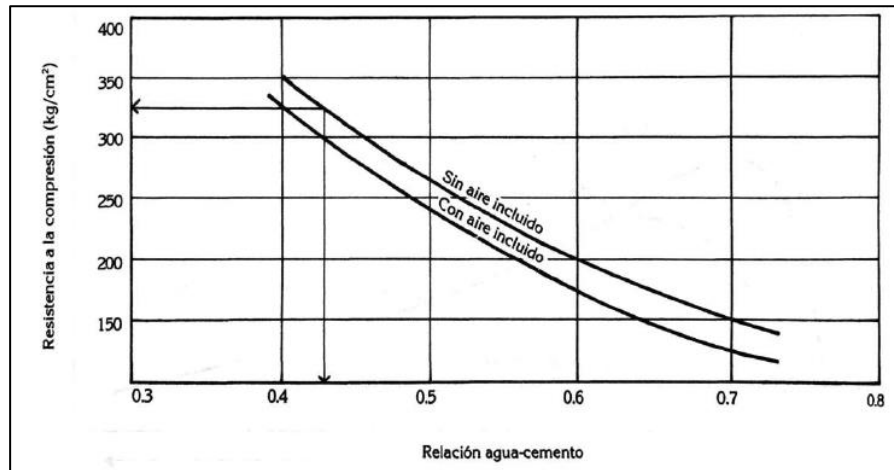
$$f'c = \frac{A}{B\left(\frac{a}{c}\right)}$$

Nota. Adaptado de Matallana Rodríguez (2019).

Donde, A y B son constantes empíricas para condiciones específicas, $f'c$ es la resistencia a compresión y (a/c) es la relación entre la cantidad de agua y de cemento. Como ya se dijo, la resistencia a compresión del concreto y la relación de agua/cemento están fuertemente relacionadas en donde mayor sea la relación agua/cemento, mayor será el agua de mezclado, “mayor es la cantidad de agua que no se combina con el cemento y por consiguiente, al disiparse la parte de agua

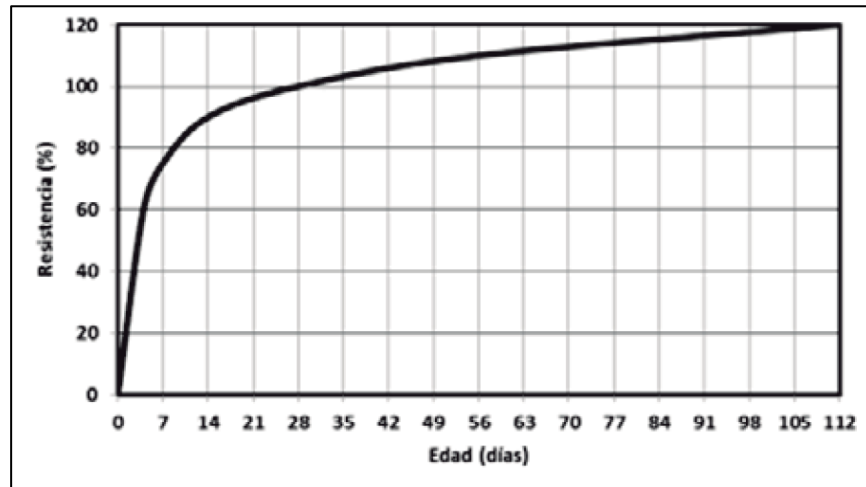
evaporable, la pasta será más porosa, más permeable, menos densa, menos durable y por lo tanto tendrá menos resistencia” (Matallana Rodríguez, 2019, p. 116). La Figura 4 muestra el comportamiento de la resistencia, según su relación agua/cemento, como se puede ver, entre 0.4 y 0.6 es el rango más utilizado para la realización de concreto.

Figura 4 Curva típica relación a/c con y sin aire incluido



Nota. Adaptado de Sánchez de Guzmán (2001).

Hay otros factores que determinan la resistencia del concreto como son los agregados, en donde, las partículas con textura rugosa y forma angular constituyen concretos más resistentes, generando una mayor adherencia con la pasta (Niño Hernández, 2010), por su parte con respecto a la granulometría, la uniformidad favorece la compacidad en estado fresco, y un TMN de agregado grande implica un menor requerimiento de agua, por lo general los concretos de alta resistencia requieren TMN pequeños. (Matallana Rodríguez, 2019). También, la edad del concreto determina su resistencia, cuyo valor aumenta a lo largo del tiempo, se supone que, para un concreto en condiciones normales, debe obtener el 70% de la resistencia especificada a los 7 días, y el 100% a los 28 días; Figura 5 muestra el comportamiento de la resistencia a lo largo del tiempo:

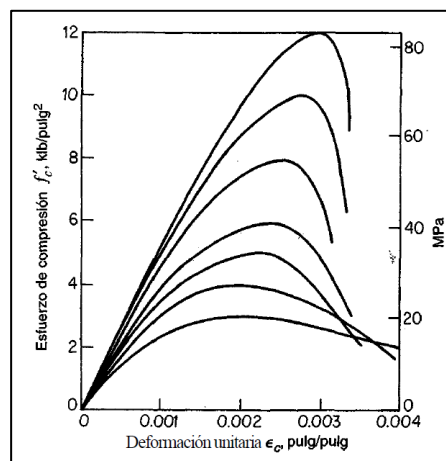
Figura 5 Curva típica relación a/c 

Nota. Adaptado de Matallana Rodríguez (2019).

Como ya se ha dicho, la resistencia a compresión del concreto es uno de los parámetros más importantes, la cual puede relacionarse a otros valores como el módulo de elasticidad, resistencia a tracción, corte, y su capacidad de deformación. Esta última está definida como la distancia máxima que se desplaza un espécimen de concreto ante una carga última P , a nivel general, las deformaciones unitarias para un concreto de densidad normal están en el rango de 0.002 a 0.003, sin embargo, si se trata de un concreto liviano sus valores están entre 0.003 y 0.0035 (Nilson, 1999).

La

Figura 6 muestra el comportamiento del esfuerzo vs deformación para un concreto de densidad normal:

Figura 6 Curva esfuerzo vs deformación del concreto

Nota. Adaptado de Nilson (1999).

Ya se ha evidenciado que el concreto tiene buenas características cuando de resistencia a compresión se trata, no obstante, no es el caso de la resistencia del concreto a tracción dado que este material no es bueno resistiendo esfuerzos a tensión, razón por la cual se tiende a utilizar acero de refuerzo para que trabaje de la mano con el concreto. Aunque, casi no se utilice la resistencia a tracción, se puede medir, ya sea mediante el módulo de rotura o simplemente mediante el ensayo de tracción indirecta o también llamado en inglés Split cylinder test descrito por la norma NTC 722. Por último, otra resistencia que suele medir es la resistencia a flexión, parámetro importante a considerar en el diseño de estructuras de concreto simple o de losas de pavimento rígido, cuyo ensayo está descrito en la ASTM C78 y la NTC 2871 (Matallana Rodríguez, 2019).

Durabilidad. La ACI 201, define esta propiedad como la “capacidad para resistir la acción de la meteorización, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. Un concreto durable conservará su forma, calidad y serviciabilidad originales al estar expuesto a su ambiente”(American Concrete Institute, 2001, p.2). Se le atribuyen en gran parte de los daños a los ciclos de congelamiento y descongelamiento, no obstante, estos pueden preverse incluyendo de 2 a 6% de aire con un inclusor de aire o utilizando un revestimiento protector. Además, este último puede ayudar para evitar la entrada de “agentes químicos, como ácidos inorgánicos, acético y carbónico y los sulfatos de calcio, sodio, magnesio, potasio, aluminio y hierro, los cuales pueden generar daños en el concreto” (Abanto Castillo, 2009, p. 57), mediante procesos de ataque de sulfatos, reacción de álcali, carbonatación, corrosión del acero de refuerzo, entre otros, (Niño Hernández, 2010).

Masa unitaria. La masa unitaria o densidad es la cantidad de masa por unidad de volumen, valor importante a tener en cuenta en el diseño para calcular el peso muerto de los elementos que tengan concreto, su valor está en el rango de 2240 a 2600 kg/m³ según diferentes autores, sin embargo, se suele asumir que es de 2400 kg/m³. La densidad puede verse influenciada por la densidad de los agregados, la cantidad de aire atrapado o incorporado, la cantidad de agua de mezclado y la cantidad de cemento (Sánchez de Guzmán, 2001).

5.1.10 *Diseño de mezcla*

Sánchez de Guzmán (2001) lo define como un “proceso que consiste en la selección de los ingredientes disponibles (cemento, agregados, agua y aditivos) y la determinación de sus cantidades relativas para producir, tan económicamente como sea posible, concreto con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera las propiedades de resistencia, durabilidad, peso unitario, estabilidad de volumen y apariencia adecuadas” (p.221).

Por otra parte, para este procedimiento, siempre que sea posible, se debe contar con datos de laboratorios, donde se pusieron a prueba los materiales que van a ser usados en obra. Algunos de estos datos son: Análisis granulométrico del agregado fino y grueso; peso unitario del agregado grueso; peso específico de masa, porcentajes de absorción y humedad de los agregados a utilizarse; tipo y marca del cemento portland escogido; peso específico del cemento portland; requerimientos de agua de mezclado, en base a experiencias con los agregados disponibles y relaciones entre la resistencia y la relación agua cemento, para las combinaciones posibles de cemento y agregados (Abanto Castillo, 2009).

Centrándonos en el procedimiento, la ACI 211 se describen 9 etapas que, de manera complementaria a los datos de laboratorios anteriormente mencionados, se utilizan para hacer un buen diseño de mezcla; si no se tienen los datos, se deben atender las recomendaciones brindadas por las empresas donde se adquirieron los materiales, revisar normativas y estudios hechos a materiales similares a los usados en campo. El proceso de la ACI 211 es descrito a continuación:

1. Determinación de la resistencia de diseño. La resistencia de diseño será mayor a la resistencia a la compresión especificada a los 28 días de curado requerida por el proyecto (f'_c), esta será la resistencia promedio requerida a la compresión (f'_{cr}), que es el promedio de la resistencia de tres especímenes hechos con la mezcla, y se hace mayor a f'_c porque en el proceso de mezclado se pueden cometer errores que disminuyen la resistencia del diseño.

2. Selección del asentamiento. Este paso consiste en la selección de la consistencia del concreto, representada en su asentamiento, que se puede determinar por medio de una prueba denominada “prueba de asentamiento”. Según Sánchez de Guzmán (2001), la selección depende de la manejabilidad deseada en el concreto fresco, por cuestiones relacionadas al espaciamiento entre aceros de refuerzo, condiciones de colocación, sistemas de compactación y otros aspectos para tener en cuenta.

3. Selección del tamaño máximo del agregado. La selección de los tamaños máximos de agregado va a depender de las dimensiones de la estructura, este debe guardar relación con espesores de la estructura, separaciones y espaciamientos entre varillas o ductos. Esto se hace dado a que, a mayores tamaños de agregado, hay menos vacíos, lo que disminuye los contenidos de agua y cemento necesarios para la mezcla.

4. Estimación del contenido de aire y la cantidad de agua. Naturalmente, en el proceso de mezclado queda aire atrapado en el concreto, sin embargo, este volumen suele ser depreciado; cuando el aire es incluido de manera intencional se deben considerar límites máximos, que dependen de los tamaños máximos de agregado. Por otra parte, la cantidad de agua depende de los requerimientos de agua del cemento, de los agregados, y de las características de los agregados tales como su perfil, tamaño y textura.

5. Selección de la relación agua-cemento. Según Abanto Castillo (2009), pp. 66) esta selección es “determinada teniendo en consideración no solamente la resistencia sino también factores como durabilidad y propiedades de acabado del concreto” (p.66). Además, este último también afirma que diferentes agregados y cementos producen resistencias diferentes para una misma relación agua-cemento, por lo que se debe establecer una relación adecuada para los materiales que se vayan a usar.

6. Cálculo del contenido de cemento. Este paso es sencillo, se calcula por medio de las variables obtenidas en los pasos 4 y 5. El cemento requerido es igual al contenido de agua dividido entre la relación agua cemento, como se ve en la Ecuación 2.

Ecuación 2 *Contenido de cemento*

$$\text{Contenido de cemento} \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{\text{Contenido de agua} \left(\frac{kg}{m^3} \right)}{\text{Relación agua - cemento}}$$

Nota. Adaptado de Niño Hernández (2010).

7. Estimación de las proporciones de agregados: Este proceso consiste en estimar los contenidos de agregados gruesos y finos que debe tener la mezcla, se basa en los tamaños máximos de agregados y en la gradación de estos.

8. Ajuste por humedad de los agregados: Este paso es necesario, pues los agregados pétreos, debido a su porosidad natural, pueden absorber el agua determinada en el paso 5, lo que

rebajaría la relación agua-cemento y por tanto su manejabilidad; también pueden generar un incremento en la relación agua-cemento, si es que los agregados están saturados de agua. Valencia y Salazar (2012), aclaran que en los casos que la humedad de los agregados sea mayor a su capacidad de absorción, es necesario hacer una disminución de la cantidad de agua de la mezcla; para los casos donde hay mayor capacidad de absorción que humedad, se debe aumentar la cantidad de agua, y que para los casos que la humedad y absorción son iguales no es necesario hacer ningún ajuste.

9. Ajustes por mezclas de prueba: El último paso consiste en realizar una mezcla de prueba, teniendo en cuenta todas las cantidades determinados en los pasos anteriores, siguiendo las indicaciones de la ASTM C192. Se deben realizar los ajustes necesarios en las cantidades de agua, contenidos de aire, e incluso, si es necesario se deben realizar ajustes de pesos iniciando desde el paso 5.

5.1.11 Ensayos de laboratorio del concreto y sus agregados

Al concreto y sus agregados se les realiza diferentes ensayos con el fin de medir sus propiedades, ensayos que por lo general van a depender si el concreto se encuentra en un estado fresco o endurecido, en ese apartado se mencionan algunos de los métodos más relevantes para la elaboración de concreto.

Ensayos para agregados. Los agregados deben cumplir con una granulometría específica para la mezcla de acuerdo a los lineamientos dispuestos en la NTC 779, posteriormente deben lavarse con agua, la cual debe cumplir con las especificaciones descritas en la NTC 3459, así como se tiene medir el peso unitario del agregado fino y grueso siguiendo los procedimientos de la NTC 237 y la NTC 176 respectivamente, determinar el grado de impurezas orgánicas (NTC 127) y por último, no se debe de olvidar medir el porcentaje de humedad de los agregados para no exceder no afectar la relación agua/cemento en la mezcla.

Ensayos para concreto fresco. Consiste en ensayos para medir los tiempos de fraguados iniciales y finales con base una resistencia a la penetración, adicional a un ensayo de consistencia normal con el aparato de Vicat (NTC 110). Durante el proceso de elaboración de probetas cilíndricas y prismáticas se sigue la NTC 550 y 1377, y se mide su consistencia por la prueba del slump mediante el procedimiento que se explica en la norma NTC 396.

Ensayos para concreto endurecido. Una vez realizados los procesos de fraguado y de curado, se realizan otros ensayos diferentes a los del concreto fresco, como la determinación de la resistencia a compresión con especímenes cilíndricos, prueba de flexión con muestras prismáticas, método para la medición de la resistencia a tracción indirecta, resistencia a sulfatos, entre otros.

5.1.12 Residuos de construcción y demolición

Según la Resolución 0472 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017) los RCD se definen como "los residuos sólidos provenientes de las actividades de excavación, construcción, demolición, reparaciones o mejoras locativas de obras civiles o de otras actividades conexas" (p.3), entre los cuales se pueden encontrar: los RCD susceptibles de aprovechamiento, como son los residuos pétreos y no pétreos, residuos de excavación y productos de cimentaciones y pilotajes; y los RCD no susceptibles de aprovechamiento, que incluyen los contaminados con residuos peligrosos, los no aprovechables por su estado y demás que por normativa ambiental no puedan aprovecharse.

La gestión de los RCD está regulada por diversas normativas a nivel nacional en Colombia. La Ley 142 de 1994, por ejemplo, establece que la gestión de residuos sólidos es responsabilidad de las empresas prestadoras del servicio de aseo (Congreso de la República de Colombia, 1994), pero, en el caso de los RCD y según el decreto 2981 de 2013, es responsabilidad del generador de los residuos el manejo de estos (Presidencia de la República de Colombia, 2013). También, el ministerio aporta la Resolución 0754 de 2014, la cual establece la estructura que deberá tener un Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos (PGIR), que es un instrumento que permite planificar y gestionar adecuadamente los residuos, donde se incluyen los residuos de construcción y demolición, y de manera más específica (Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio y Ministerio

de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014), la Resolución 0472 de 2017 establece los requisitos y procedimientos para la gestión integral de los RCD en Colombia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017b).

5.1.13 Extracción minera

La minería en Colombia está regulada principalmente por el código de minas que fue expedido en la ley 685 de 2001 por el Congreso de la República de Colombia (2001), en él se detallan, por ejemplo, en el artículo 204 los medios e instrumentos ambientales para la vigilancia de las labores mineras, que pueden ser los planes de manejo ambiental, las licencias ambientales y el estudio de impacto ambiental que define los planes de prevención, mitigación, corrección y compensación de esos impactos, entre otras herramientas. Además, en el decreto 1666 de 2016 (Presidencia de la República de Colombia, 2016) se tiene la clasificación de los proyectos de minería según el tipo de material en proyecto de pequeña, gran y mediana escala, como se puede ver en la siguiente tabla tomada del mismo decreto.

Tabla 6 Clasificación de la Minería a pequeña, mediana y gran escala en etapa de explotación

Mineral	Pequeña		Mediana		Grande	
	Subterráneo a	Cielo Abierto	Subterráneo a	Cielo Abierto	Subterráneo a	Cielo Abierto
Carbón (Ton/año)	Hasta 60.000	Hasta 45.000	>60.000 hasta 650.000	>45.000 hasta 850.000	> 650.000	> 850.000
Materiales construcción (M3/año)	N/A	Hasta 30.000	N/A	>30.000 hasta 350.000	N/A	> 350.000
Metálicos (Ton/año)	Hasta 25.000	Hasta 50.000	>25.000 hasta 400.000	>50.000 hasta 750.000	>400.000	> 750.000
No Metálicos (Ton/año)	Hasta 20.000	Hasta 50.000	>20.000 hasta 300.000	>50.000 hasta 1.050.00 0	>300.000	>1.050.00 0
Metales Preciosos (oro, plata y platino)	Hasta 15.000 Ton/año	Hasta 250.000 m3/año	>15.000 hasta 300.000 Ton/año	> 250.000 hasta 1.300.00 0 m3/año	>300.000 Ton/año	>1.300.00 0 m3/año
Piedras preciosas y semipreciosa s (Ton/año)	Hasta 20.000	N/A	>20.000 Hasta 50.000	N/A	>50.000	N/A

Nota. Adaptado de Presidencia de la República de Colombia (2016).

Ahora bien, a nivel económico la explotación minera en Colombia es una de las más fuertes de toda Latinoamérica, pues a pesar de que solo el 5% del terreno del país está titulado para la actividad minera, al año 2021 en LATAM, Colombia fue el exportador número 1 de Carbón y

esmeraldas, el 4 en oro y ferroníquel, y el 6 en cobre, además de comprender el 5% del presupuesto de exploración de metales no ferrosos de toda LATAM (Agencia Nacional de Minería, 2023).

Con todo eso, es importante destacar que la actividad minera se puede clasificar en grupos según el uso de cada mineral y su explotación, siendo el sector de los materiales de construcción el más grande, con un 57% de la explotación total de materiales. En el grupo de materiales de construcción, destacan la extracción de gravas, arenas y recebo, lo que se puede observar en la Tabla 7.

Tabla 7 *Volúmenes de explotación de materiales de construcción asociados a pagos de regalías año 2022*

Clasificación mineral	Mineral	Unidad de medida	Total año 2022
Materiales de construcción	Arenas	Metro cúbico (m3)	1,953,005
	Asfaltitas	Metro cúbico (m3)	14,956
	Diabasa	Metro cúbico (m3)	613,814
	Gravas	Metro cúbico (m3)	4,198,885
	Recebo	Metro cúbico (m3)	3,179,124
	Subtotal materiales de construcción		

Nota. Adaptado de Agencia Nacional de Minería (2023).

5.2. Marco conceptual

Los Residuos de Construcción y Demolición, RCD, son todo residuo sólido proveniente de actividades como la excavación, demolición, reparaciones, construcción y mejoras relativas a obras civiles, estos se pueden conseguir como parte de una obra civil o en lugares destinados a su depósito como lo pueden ser una escombrera, un relleno sanitario, una planta de aprovechamiento, etc. Estos residuos están compuestos por todo material sobrante de las actividades anteriormente nombradas, por lo que se pueden encontrar materiales como el hormigón, acero, vidrio, suelos, ladrillos, entre otros. De los RCD se destacan materiales que por su estado pueden ser aprovechados, los ladrillos, por ejemplo, son fácilmente aprovechables, y esto es en gran medida debido a que los ladrillos suelen desecharse porque se quebraron, hubo una demolición de algún muro, sobraron u otras razones que indican que el estado de estos era bueno en el momento de ser desechados.

Ahora bien, los ladrillos son bloques hechos de arcilla, que pueden ser macizos como los adoquines, o ser huecos como el ladrillo número 4, además, tienen características tales como una gran porosidad, que comparten todos los ladrillos de arcilla, la resistencia a altas temperaturas de los ladrillos refractarios o una buena capacidad portante como la de los ladrillos estructurales. Sus usos varían según el tipo de ladrillo, pero suelen ser utilizados en la construcción de paredes, muros portantes, hornos e incluso se pueden utilizar en la estructura de los pavimentos.

5.3. Marco geográfico

A continuación, en la Figura 7 se puede ver la ubicación de la ciudad de Villavicencio en el departamento del Meta, asimismo se puede ver la ubicación de dicho departamento en Colombia, en el recuadro ubicado en la zona inferior derecha de la imagen.

Figura 7 *Ubicación de Villavicencio en el Meta y del Meta en Colombia.*



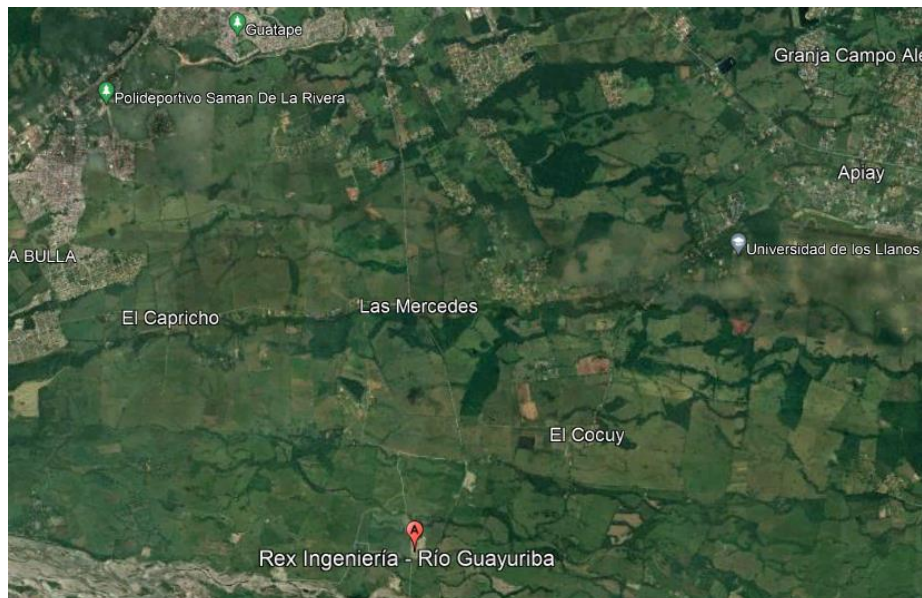
Nota. Adaptado de Milenioscuro (2012).

Adicionalmente, se especifican las ubicaciones de la Universidad Santo Tomás en Villavicencio (Figura 8), que fue donde se llevaron a cabo los diferentes laboratorios y prácticas de la presente investigación. La universidad, está ubicada en la Carrera 22 con Calle 1ª en la Vía Puerto López.

Figura 8 Ubicación de la Universidad Santo Tomás

Nota. Adaptado de Google Maps (2023b).

A continuación, se señala la ubicación de la cantera del Guayuriba (Figura 9), lugar del cual se obtuvieron los agregados finos y gruesos utilizados en el proyecto.

Figura 9 Ubicación de la cantera del río Guayuriba

Nota. Adaptado de Google Maps (2023a).

5.4. Estado del arte

El campo de la construcción consume una gran cantidad de recursos y genera impactos directos en el medio ambiente, tan solo en la Unión Europea, la construcción de edificios consume alrededor del 40% de los recursos naturales, de los cuales, la mayoría termina convirtiéndose en Residuos de Construcción y Demolición RCD (Baño Nieva, 2005), además, muchos de estos recursos provienen de canteras, cuya explotación degrada ecosistemas que a su vez se deriva en afectaciones en los cuerpos hídricos, afectaciones sociales y problemas de salubridad (Herrera Durán, 2015); es por esto que, se ha hecho necesaria la búsqueda de alternativas sostenibles que puedan reutilizar parte de estos residuos en las obras de construcción para reducir el impacto ambiental (Lage et al., 2012).

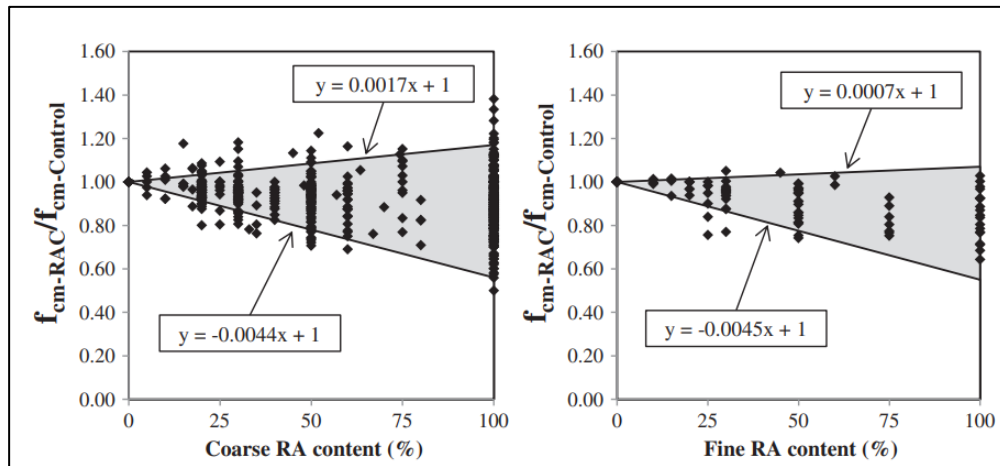
El primer registro del uso de agregado reciclado en el concreto fue en 1860 en Alemania, en donde se utilizó cemento Portland con ladrillo triturado para la fabricación de concreto manufacturado (Hansen, 1992), posteriormente, casi un siglo después, se utilizaron como agregados residuos de construcción y demolición, para la fabricación de concreto destinado a la reconstrucción de Europa después de la segunda guerra mundial (Atyia et al., 2021). Aunque se tienen registros del uso de RCD, no ha sido hasta después del año 2000, que se ha investigado realmente las propiedades y usos que pueden tener los RCD como parte de los agregados en el concreto (Kisku et al., 2017).

Varios países han estado investigando el uso de este tipo de agregados para ser utilizados en las construcciones, tal es el caso de Holanda, en donde debido a la falta de disponibilidad de agregados pétreos, se utilizó ladrillo triturado para reemplazar un 20% del agregado grueso en el concreto, para la construcción de un viaducto cerca de la ciudad de Helmond (European Thematic Network, 2000), caso similar es el que sucede en Bangladesh y en la India, países en los que el agregado grueso es escaso y resulta más económico utilizar ladrillo triturado como agregado grueso (Rashid et al., 2009) (Sunanda et al., 2016), de igual manera, también se ha utilizado agregados reciclados para la construcción en Reino Unido para la realización de una losa de concreto de 50 cm de espesor de la segunda planta de un edificio en la ciudad de Cardington (European Thematic Network, 2000), y en Hong Kong para la realización de un proyecto en el que se utilizaron 13000 m³ de concreto reciclado (Poon y Chan, 2007).

Con respecto a las propiedades que puede presentar el concreto reciclado, se han generado múltiples investigaciones para estudiar las propiedades de resistencia, permeabilidad, conductividad eléctrica, densidad, entre otras; ya sea con residuos de construcción o con ladrillo triturado, reemplazando parte del agregado grueso, fino e incluso el cemento para la realización de concreto. Por lo general, las mezclas con agregados reciclados presentan menores resistencias a la compresión que las mezclas convencionales (Cabral et al., 2010), las cuales pueden tener reemplazos de 1 a 100% (Paul, 2017). Pacheco-Torgal y Jalali (2010) investigaron las propiedades que puede tener un concreto, reemplazando el 100% de los agregados gruesos por residuos cerámicos (mezcla de ladrillos cerámicos; azulejo blanco y porcelana sanitaria), en el cual se obtuvo un incremento en la resistencia a la compresión del 11%.

Otros autores han investigado la influencia del ladrillo triturado reemplazando parte del agregado grueso y la mayoría coincide en que a medida se aumenta el porcentaje de reemplazo, la resistencia a la compresión disminuye, Debieb y Kenai (2008) utilizaron porcentajes de reemplazo de 25, 50, 75 y 100% y obtuvieron disminuciones de la resistencia del 20 al 30%. Valores similares obtuvo Moreno Anselmi et al. (2019), el cual reemplazó el 100% del agregado y encontró una disminución en la resistencia del 30%, por otro lado Bermúdez Hernández (2021) reemplazó el 75% y tuvo un decremento del 15%, y Viviana y Rojas (2012), reemplazaron entre el 10 al 30% y obtuvo disminución en la resistencia a compresión del 2 al 6%, en donde este afirma que el máximo porcentaje de reemplazo es del 30%. Aliabdo et al. (2014), sugieren reemplazar hasta un 25% para mezclas de 350 kg/m^3 y 50% para mezclas de 250 kg/m^3 respectivamente, sin embargo, Masías Mogollón (2018), afirma que el porcentaje óptimo de reemplazo del agregado grueso es del 10% para obtener los mejores comportamientos a compresión. Silva et al. (2014), en la figura, hizo una recopilación de información acerca del comportamiento de la resistencia a compresión con respecto al porcentaje de reemplazo para el agregado grueso y fino.

Figura 10 Relación entre la resistencia a la compresión y el porcentaje de reemplazo del agregado fino y grueso



Nota. Adaptado de Silva et al. (2014).

También, se ha investigado otras propiedades, como la resistencia a la tracción, Khaloo (1994) y Hansen (1992), encontraron un incremento a la tensión al utilizar ladrillo triturado como parte del agregado grueso, comparándolo con agregados naturales. Con respecto a la resistencia a la flexión, Sharba et al. (2021), usaron porcentajes 0%, 13%, 26%, 39% y 52% como sustitución en peso del árido grueso, y las muestras mostraron buen comportamiento a cortante de las vigas de concreto cotejando los datos con las muestras de control, no obstante, Masías Mogollón (2018), afirman que el módulo de rotura se ve afectado más allá del 10% de reemplazo del agregado grueso.

El módulo de elasticidad se ve afectado también al utilizar ladrillo triturado, Aliabdo et al. (2014) y Kisku et al. (2017), reportaron disminuciones en todos los porcentajes de reemplazo de agregado. Aliabdo et al. (2014) concluyeron que entre mayor sea el contenido de cemento mayor es la reducción en el módulo de elasticidad, y también, que la mayoría de las fórmulas conocidas para calcular el módulo, no son aplicables para concretos reciclados debido a las variaciones que pueden presentar.

Estos concretos reciclados al estar compuestos por agregados artificiales suelen tener pesos unitarios más bajos que los agregados tradicionales, lo cual se traduce en concretos más livianos, y menos carga muerta, sin embargo, esto también significa en que pueden requerir del consumo de otros materiales participantes dentro de la mezcla de concreto, tal como el cemento (Moreno Anselmi et al., 2019). Además de las bajas densidades, estos concretos presentan un mayor

consumo de agua, debido a que el ladrillo al tener una estructura porosa suele requerir una mayor cantidad de agua, lo cual se traduce en concretos con una mayor porosidad, mayor permeabilidad y una disminución en la trabajabilidad (Atyia et al., 2021).

El uso de ladrillo triturado en otras investigaciones puede tener otras aplicaciones; se ha demostrado que los bloques de arcilla contribuyen a la resistencia a la penetración de cloruros a medida del aumento de su contenido en el concreto, es decir, existe un aumento en la resistencia a materiales corrosivos y por lo tanto un aumento en la durabilidad (Adamson et al., 2015).

5.5. Marco normativo

El presente apartado muestra las normativas a tener en cuenta para el desarrollo del presente proyecto.

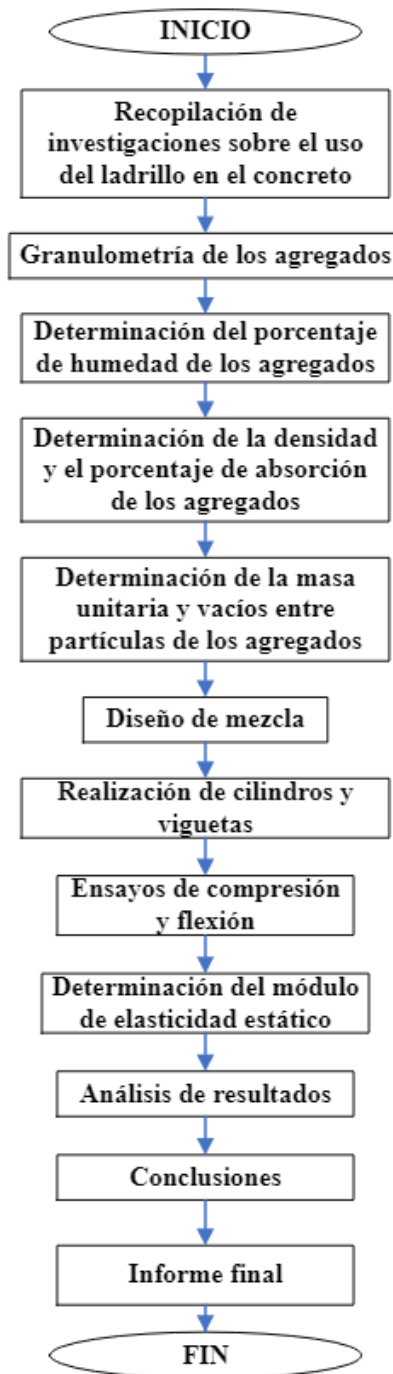
Tabla 8 *Marco normativo*

Norma	Descripción
NSR-10	Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10
NTC 77	Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos
NTC 174	Especificaciones de los agregados para concreto
NTC 176	Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso
NTC 237	Método de ensayo para determinar la densidad y la absorción del agregado fino
NTC 127	Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas en agregado fino para concreto
NTC 3459	Agua para la elaboración de concreto
NTC 121	Cemento Portland. Especificaciones físicas y mecánicas
NTC 110	Método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico
NTC 118	Método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat
NTC 1377	Elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio
NTC 396	Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto
NTC 673	Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto
NTC 2871	Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión
NTC 4025	Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión

6. Metodología

A continuación, se mencionan las etapas que se abordaron en la investigación para la obtención de los resultados.

Figura 11 Metodología de la investigación



6.1. Descripción de etapas y tareas

6.1.1 Recopilación de investigaciones sobre el uso del ladrillo en el concreto

Se realizó un proceso investigativo sobre todos los trabajos, artículos, tesis, libros, entre otros, en los que se indagaba sobre el uso del ladrillo triturado como reemplazo del agregado grueso y fino, y su comportamiento al ser utilizado en mezclas de concreto, todo esto para comparar los resultados de la presente investigación con los obtenidos por los autores. Para realizar este proceso, se utilizaron las bases de datos de artículos científicos como Science direct, Scopus, ResearchGate, Scielo, Google Académico, entre otros, de igual manera se investigó en el repositorio institucional.

6.1.2 Granulometría de los agregados

El agregado grueso y fino deben cumplir con unas especificaciones, una de estas es la granulometría, en el cual, estos agregados deben cumplir con la norma técnica NTC 77, y el agregado grueso debe estar sujeto al TMN especificado en el diseño de mezcla, además, el triturado de ladrillo debe cumplir también con este parámetro ya que este va a reemplazar el 5, 10 y 15% del agregado grueso del concreto.

6.1.3 Determinación del contenido de humedad de los agregados

Los agregados pétreos a priori de la realización de los especímenes tienen un porcentaje de humedad, el cual puede generar variaciones en la relación agua cemento planteada en el diseño de mezcla; se sigue la norma técnica NTC 237.

6.1.4 Determinación de la densidad y el porcentaje de absorción de los agregados

La densidad de los agregados se tiene que determinar, ya que estos valores son relevantes para la realización del diseño de mezcla; la absorción se utiliza para corregir la cantidad de agua necesaria de la mezcla, se sigue la norma NTC 176.

6.1.5 Determinación de la masa unitaria y vacíos entre partículas de los agregados

Con la NTC 92, Se determina la masa unitaria en condición compactada o suelta y el cálculo de los vacíos entre las partículas de agregados finos y gruesos.

6.1.6 Diseño de mezcla

Para efectos de esta investigación se tuvieron que hacer 4 diseños de mezcla, para concreto convencional y para los 3 porcentajes de reemplazo del agregado grueso. 5, 10 y 15%. Para hacer el diseño se realiza siguiendo el procedimiento descrito en la ACI 211.

6.1.7 Realización de cilindros y viguetas

Para la presente investigación se realizaron especímenes para concreto modificado con 3 tipos diferentes de ladrillo (número 4, estructural y adoquín), para cada uno de los 3 porcentajes (5, 10 y 15%) y otras muestras fueron realizadas utilizando el aditivo reductor de agua y retardante, EUCON WR 60 ® de la marca EUCLID CHEMICAL TOXEMENT. Para cada categoría se hicieron 3 cilindros y 2 viguetas, para 7, 14, y 28 días, en total se realizaron 126 cilindros y 28 viguetas.

6.1.8 Ensayos de compresión, flexión y determinación del módulo de elasticidad

Se fallaron los cilindros para 7, 14 y 28 días, y las viguetas solo a los 28 días; esto se realizó en la máquina universal para medir la carga máxima que los cilindros pueden resistir a compresión y a flexión. De igual manera, se midieron las deformaciones verticales de los especímenes, con las cuales se puede determinar el módulo de elasticidad estático.

6.1.9 Análisis de resultados

Con la resistencia a compresión, flexión y las deformaciones se realizan comparaciones entre los concretos modificados con ladrillo número 4, estructural, adoquín, para los 3 porcentajes y con el aditivo reductor de agua y retardante, y se determina qué porcentajes y qué ladrillo tuvieron los mejores resultados.

7. Caracterización de los materiales

7.1. Caracterización inicial

7.1.1 Agregado grueso y fino

El agregado grueso y fino fueron adquiridos de la cantera Rex Ingeniería, la cual extrae sus materiales directamente del río Guayuriba, por lo tanto, los agregados gruesos van a estar compuestos tanto por rocas de forma esférica debido a la erosión causada en el transporte de estas por el cauce, como por rocas angulosas debido al triturado hecho en la cantera o a procesos naturales como la meteorización de las rocas.

Por otra parte, Beltrán Quimbayo y Cuesta Alvarado (2019) hacen un análisis petrográfico de los agregados de varias canteras, incluyendo la cantera Rex Ingeniería, donde se encontró que un 50% de sus rocas son sedimentarias y el otro 50% son metamórficas, además, a nivel mineralógico la composición de las rocas es un 65% cuarzo, un 20% feldespatos, un 10% de fragmentos líticos y un 5% de otros minerales.

7.1.2 Cemento

Se utilizó cemento tipo I de uso general Argos, el cual debe cumplir con la NTC 121, la Tabla 9 muestra sus principales especificaciones técnicas.

Tabla 9 Especificaciones técnicas cemento Argos

Densidad (kg/m³)	2940
Módulo de finura (cm²/g)	4590
Tiempo de fraguado inicial (min)	No menos 45
Tiempo de fraguado final (min)	No más de 420
Contenido de aire en volumen de mortero, máx (%)	12

Nota. Adaptado de Cortes Gómez y Perilla Sastoque (2014), y Argos (2020).

7.1.3 Ladrillo triturado

Para el reemplazo del agregado grueso de las mezclas de concreto modificado se utilizó triturado de ladrillo número 4, ladrillo estructural y ladrillo adoquín de arcilla para tránsito peatonal y vehicular liviano.

Ladrillo número 4. Es utilizado para la construcción de muros divisorios y mampostería no estructural. Las dimensiones del ladrillo utilizado son de 10 x 20 x 30 cm, este se muestra en la Figura 12.

Figura 12 Ladrillo número 4



Nota. Adaptado de El Trebol Ladrillera (s.f).

Con respecto a las especificaciones técnicas de este ladrillo, la ladrillera Santa fe en la ficha técnica presenta las siguientes en la Tabla 10.

Tabla 10 Especificaciones técnicas ladrillo número 4

Dimensiones (cm)	10 x 20 x 30
Peso/unidad (kg)	5.7
Resistencia a la compresión (MPa)	2.0
Absorción de agua (%)	14
Normativa	NTC 4205-2

Nota. Adaptado de Ladrillera Santafé (s/f).

Ladrillo estructural. Es ideal para la mampostería estructural debido a su alta resistencia y durabilidad. Este ladrillo se muestra en la Figura 13.

Figura 13 *Ladrillo estructural*



Nota. Adaptado de Distriarcillas (s.f).

La ladrillera Santa fe en la ficha técnica presenta sus especificaciones en la siguiente tabla.

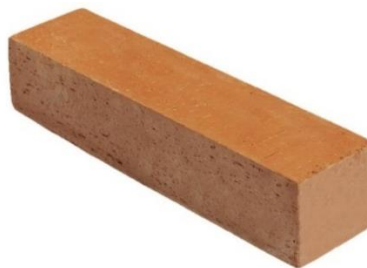
Tabla 11 *Especificaciones técnicas ladrillo estructural*

Dimensiones (cm)	29 x 9 x 15
Peso/unidad (kg)	4.7
Resistencia a la compresión (MPa)	24.7
Absorción de agua (%)	13
Normativa	NTC 4205-1, NTC 4205-3

Nota. Adaptado de Ladrillera Santafé (s/f).

Ladrillo adoquín. Se utilizó ladrillo adoquín de arcilla para tránsito peatonal y vehicular liviano, cuyas dimensiones son de 6 x 6 x 25 cm, este se muestra en la Figura 14.

Figura 14 *Ladrillo adoquín*



Nota. Adaptado de Ladrillera Santafé (s/f).

La ladrillera Santa fe en la ficha técnica presenta sus especificaciones en la Tabla 12.

Tabla 12 Especificaciones técnicas ladrillo adoquín para tránsito peatonal y vehicular liviano

Dimensiones (cm)	26 x 6 x 6
Peso/unidad (kg)	2
Resistencia a la compresión (MPa)	48.3
Absorción de agua (%)	11
Normativa	NTC 3829 y NTC 4017

Nota. Adaptado de Ladrillera Santafé (s/f).

7.1.4 Aditivo

Como ya se mencionó, se utilizó el aditivo EUCON WR 60 ® de la marca EUCLID CHEMICAL TOXEMENT, el cual es un aditivo reductor de agua y retardante de fraguado de rango medio, cuyo propósito era el de evaluar el comportamiento de los especímenes de concreto que pudieran presentar al utilizar ladrillo triturado, dado que el ladrillo en su estructura es poroso y genera una mayor absorción de agua de mezclado, por lo cual el uso del aditivo es para contrarrestar este efecto. El aditivo se muestra a continuación en la

Figura 15.

Figura 15 Aditivo Eucon WR 60



Nota. Adaptado de Ingeniería y arquitectura aplicadas (s/f).

Según la ficha técnica, el aditivo se dosifica del 0.2% al 0.5% del peso del cemento e incrementa la trabajabilidad, reduce la segregación y permite una reducción de agua mayor al 10% (EUCLID CHEMICAL TOXEMENT, 2021).

7.2. Granulometría de los agregados

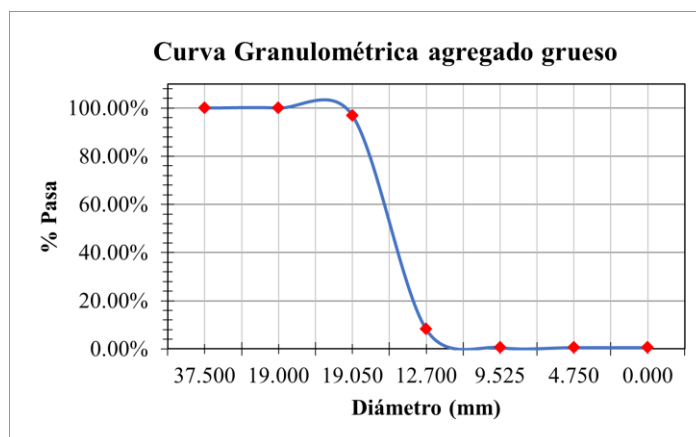
Otro aspecto importante para la caracterización de los materiales es la granulometría de los agregados finos y gruesos. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para dichos agregados.

7.2.1 Agregado grueso

Para el agregado grueso se hizo el respectivo análisis granulométrico, del cual se puede concluir que el Tamaño Máximo de partícula es de 1", mientras que el Tamaño Máximo Nominal de las partículas va a ser de ¾". Además, se evidencia que la mayoría de las partículas son de tamaños similares, pues, casi el 90% de la muestra quedó retenida en el tamiz de media pulgada

Tabla 13 *Granulometría agregado grueso*

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (gr)	% Peso retenido	% Pasa
1 1/2"	37.50	0	0.00%	100.00%
1"	19.00	0	0.00%	100.00%
3/4"	19.05	30.5	3.05%	96.95%
1/2"	12.70	887.4	88.74%	8.21%
3/8"	9.53	76.5	7.65%	0.56%
#4	4.75	0	0.00%	0.56%
Fondo	0	0	0.00%	0.56%
Total	-	994.4	99.44%	-
Masa total inicial (gr)	1000	Error total	5.6 gr	0.56%

Figura 16 Curva granulométrica agregado grueso

7.2.2 Agregado fino

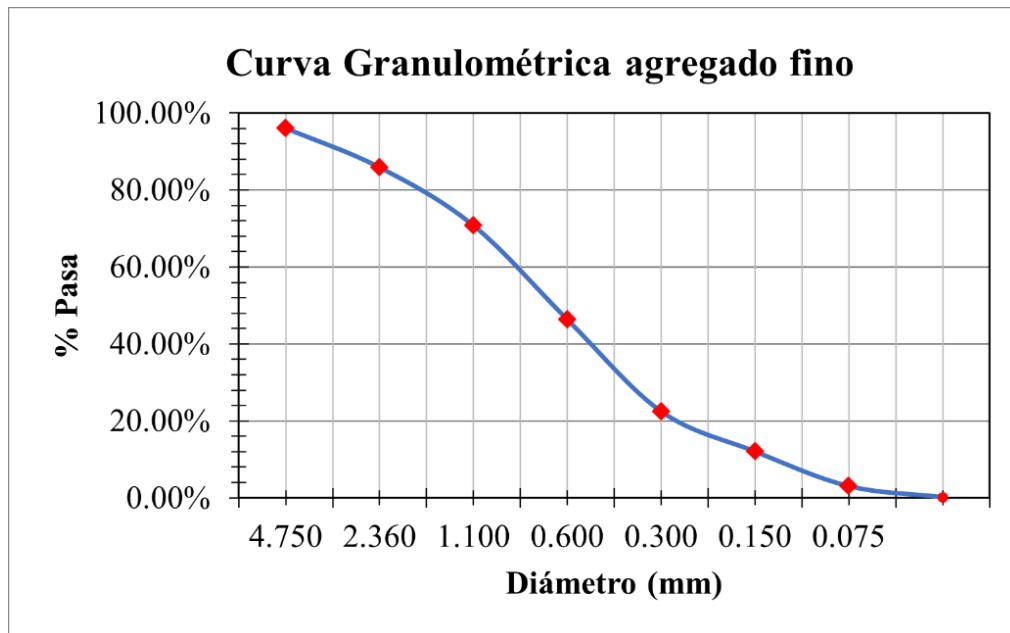
Según la Tabla 14, los tamices 30 y 50 fueron los que más arena retuvieron, cerca del 50% de la muestra. Por último, el módulo de finura calculado para esta muestra fue de 2.7 que concuerda con el rango establecido en la NTC 174, donde se indica que los módulos de finura no deben ser menores de 2.3 ni mayores de 3.1.

Tabla 14 Granulometría agregado fino

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (gr)	% Peso retenido	% Pasa
#4	4.750	19.9	3.98%	96.02%
#8	2.360	50.8	10.16%	85.86%
#16	1.100	75.4	15.08%	70.78%
#30	0.600	122.1	24.42%	46.36%
#50	0.300	119.5	23.90%	22.46%
#100	0.150	52.1	10.42%	12.04%
#200	0.075	45.1	9.02%	3.02%
Fondo	0	14.3	2.86%	0.16%
Total	-	499.2	99.84%	-
Masa total inicial (gr)	500	Error total	0.8 gr	0.16%

También, se puede ver una distribución en la retención del material para todos los tamices, lo que también se aprecia en la Figura 17, e indica una buena gradación de la arena.

Figura 17 Curva granulométrica agregado fino



7.3. Determinación del contenido de humedad de los agregados

7.3.1 Contenido de humedad agregado fino

La arena proveniente de la cantera del río Guayuriba contenía una relación de aproximadamente 7 gr de agua por 100 gr de arena seca, esto se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15 *Contenido de humedad agregado fino*

Masa inicial de la muestra (gr)	Masa de la muestra seca (gr)	Contenido de humedad	Contenido de humedad promedio
547.70	509.90	7.413%	7.240%
616.8	575.6	7.158%	
692.4	646.2	7.149%	

7.3.2 Contenido de humedad agregado grueso

La grava proveniente de la cantera del río Guayuriba contenía una relación de aproximadamente 0.3 gr de agua por 100 gr de grava seca, esto se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16 *Contenido de humedad agregado grueso*

Masa inicial de la muestra (gr)	Masa de la muestra seca (gr)	Contenido de humedad
731.5	728.7	0.38%

7.4. Determinación de la densidad y porcentaje de absorción de los agregados

Se siguió los procedimientos descritos en la NTC 176 y en la NTC 237 para su cálculo, estos valores se dilucidan en la Tabla 17.

Tabla 17 Densidad y porcentaje de absorción de los agregados

Tipo de agregado	Densidad (gr/cm³)	Absorción (%)
Agregado fino	2.701	0.503
Agregado grueso	2.597	0.69
Ladrillo número 4 triturado	-	16.49
Ladrillo estructural triturado	-	3.95
Ladrillo adoquín triturado	-	27.71

7.5. Determinación de la masa unitaria y vacíos entre partículas de los agregados

Se calculó la masa unitaria suelta y su porcentaje de absorción por el procedimiento por paleo y por apisonamiento tanto para el agregado grueso como para el agregado fino, en la Tabla 18 se muestra los resultados.

Tabla 18 Masa unitaria y contenido de vacíos de los agregados

Procedimiento	Agregado fino		Agregado grueso	
	Masa unitaria suelta (kg/m³)	Contenido de vacíos (%)	Masa unitaria suelta (kg/m³)	Contenido de vacíos (%)
Paleo	1719.3	36.35	1505.6	42.03
Apisonamiento	1873.8	30.63	1581.9	39.09
Promedio	1796.3	33.49	1543.7	40,56

8. Diseño de mezcla

Para la realización de este diseño se tuvieron en cuenta los procedimientos descritos en la ACI 211, en donde se tuvo que realizar 4 relaciones agua cemento, para concreto convencional, 5, 10 y 15% de ladrillo triturado de reemplazo de agregado grueso.

8.1. Datos iniciales

En la Tabla 19 se muestran los datos iniciales necesarios para el diseño de mezcla.

Tabla 19 *Datos iniciales diseño de mezcla*

f'c (Mpa)	21
Densidad agregado fino (kg/m³)	2701
Densidad agregado grueso (kg/m³)	2597
Densidad cemento (kg/m³)	2940
Densidad agua (kg/m³)	1000

8.2. Selección del asentamiento

El asentamiento se selecciona dependiendo del tipo de elemento que se va a realizar, en el caso de la realización de los especímenes, se selecciona como si se fuera realizar una losa, un muro, una viga, columna o una cimentación, la cual se va a colocar de forma manual. En la Tabla 20 se muestra el asentamiento de diseño para las mezclas de concreto.

Tabla 20 *Asentamiento de diseño*

Consistencia	Media plástica
Asentamiento (mm)	50-100

8.3. Selección del tamaño máximo del agregado

El tamaño máximo del agregado se selecciona con respecto a la dimensión mínima de la sección de concreto a realizar y el tipo de estructura a realizar. En este caso la dimensión mínima de los moldes de los cilindros y viguetas es 15 cm, y la estructura se asimila a una viga o columna reforzada; la selección del tamaño máximo se realiza con respecto a la Tabla 21, la cual es de 3/4”.

Tabla 21 Selección del tamaño máximo del agregado

Dimensión mínima de la sección (cm)	Muros reforzados, vigas y columnas	Muros sin refuerzo	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6-15	1/2" – 3/4"	3/4"	3/4" – 1"	3/4" – 1 3/4"
19-29	3/4" – 1 1/2"	1 1/2"	1 1/2"	1 1/2" – 3"
30-74	1 1/2" – 3"	3"	1 1/2"	3"
75 o más	1 1/2" – 3"	6"	1 1/2"	3" – 6"

Nota. Adaptado de Sánchez de Guzmán (2001).

8.4. Estimación del contenido de aire y la cantidad de agua

Este paso se realiza con respecto al tamaño máximo del agregado (19 mm), el asentamiento y si el concreto tiene aire incluido o no. La cantidad de agua es 200 kg/m³ de acuerdo con la Tabla 22.

Tabla 22 Estimación del contenido de aire y la cantidad de agua

Asentamiento (cm)	Tamaños máximos nominales (mm)						
	10	13	19	25	38	50	75
0.0 – 2.5	185	180	165	160	140	135	125
3.0 – 5.0	205	200	185	180	160	155	145
5.5 – 7.5	215	210	190	185	170	165	155
8.0 – 10.0	225	215	200	195	175	170	165
10.5 – 15.0	235	225	205	200	180	175	170
15.5 – 18.0	240	230	210	205	185	180	175
% Contenido de aire	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3

Nota. Adaptado de Matallana Rodríguez (2019).

8.5. Determinación de la resistencia de dosificación

Debido a que no se tienen pruebas de resistencia en donde se usaron materiales y condiciones similares a aquellas que serán empleadas, la resistencia f'_{cr} de la mezcla está determinada por la Tabla 23.

Tabla 23 Resistencia de diseño de la mezcla

Resistencia especificada $f'c$ (kg/cm²)	Resistencia de diseño de la mezcla f'_{cr} (kg/cm²)
Menos de 210	$f'c + 70$
De 210 a 350	$f'c + 85$
Más de 350	$f'c + 100$

Nota. Adaptado de Sánchez de Guzmán (2001).

8.6. Selección de la relación agua-cemento

La Universidad Pontificia Javeriana realizó una tabla que relaciona la relación agua-cemento con la resistencia a compresión del concreto a los 28 días para un cemento Portland tipo I sin aire incluido, la Tabla 24 se muestra a continuación.

Tabla 24 Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días y la relación a/c

Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Relación agua-cemento en peso		
	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0.72	0.65
175	-	0.65	0.58
210	0.70	0.58	0.53
245	0.64	0.53	0.49
280	0.59	0.48	0.45
315	0.54	0.44	0.42
350	0.49	0.40	0.38

Nota: Adaptado de Sánchez de Guzmán (2001).

Se realiza la interpolación con el límite medio para una resistencia de 29.5 MPa.

Tabla 25 Relación agua cemento

Resistencia (MPa)	Relación agua-cemento
29.5	0.463

8.7. Cálculo del contenido de cemento

Se utiliza la Ecuación 2.

Ecuación 2 Contenido de cemento

$$\text{Contenido de cemento} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\text{Contenido de agua} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)}{\text{Relación agua - cemento}}$$

Nota: Adaptado de Niño Hernández (2010).

Se calcula:

Tabla 26 *Contenido de cemento*

Contenido de cemento (kg/m³)	432.10
--	--------

8.8. Cálculo del volumen de agregado

Se realiza el cálculo de volumen de agregado (fino + grueso) para 1 m³ teniendo en cuenta la cantidad de agua y cemento utilizando la ecuación de densidad. Esto se muestra en la Ecuación 3.

Ecuación 3 Volumen de agregado

$$\text{Vol agregado} = 1 - \frac{\text{Masa cemento}}{\text{Densidad cemento}} - \frac{\text{Masa agua}}{\text{Densidad agua}}$$

Se calcula:

Tabla 27 *Volumen de agregado*

Volumen de agregado (m³)	0.653
--	-------

8.9. Cálculo de la masa del agregado

Para calcular su masa se supone una densidad promedio entre el agregado grueso y el agregado fino. La densidad promedio se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28 *Densidad promedio del agregado*

Densidad agregado fino (kg/m³)	2701
Densidad agregado grueso (kg/m³)	2597
Densidad promedio (kg/m³)	2643

Con la densidad promedio se calcula la masa del agregado.

Tabla 29 *Masa del agregado*

Masa del agregado (kg)	1726.07
-------------------------------	---------

8.10. Cálculo de la masa del agregado grueso y fino

Se realiza la suposición que la grava ocupa el 55% y la arena el 45% del agregado.

Tabla 30 *Masa del agregado*

Masa del agregado fino (kg)	776.74
Masa del agregado grueso (kg)	949.34

8.11. Relación agua-cemento

Con las masas de todos los agregados del concreto ya se tiene la relación agua-cemento, la cual servirá para calcular las cantidades de material para los especímenes. Como se mencionó al comienzo de este apartado hay 4 relaciones agua cemento diferentes, para un concreto convencional, y para un reemplazo del agregado grueso del 5, 10 y 15% de ladrillo triturado (#4, estructural y adoquín). Para los especímenes con ladrillo triturado se tuvo que realizar su corrección por la absorción del agua según el tipo de ladrillo. Con respecto a los especímenes con aditivo reductor de agua se realizó una reducción del 10% del agua de mezclado y se utilizó un reemplazo del 10% del agregado grueso siguiendo la recomendación de Masías Mogollón (2018), asimismo, se hicieron muestras de prueba para la activación correcta del aditivo según las recomendaciones del fabricante.

8.11.1 Relación agua cemento concreto convencional**Tabla 31** Relación agua cemento concreto convencional

Agregado	Agua	Cemento	Arena	Grava
Masa (kg)	200	432.10	776.74	949.34
Densidad (kg/m³)	1000	2940	2701	2597
Relación	0.463	1.000	1.798	2.197

8.11.2 Relación agua cemento concreto con reemplazo del 5% del agregado grueso**Tabla 32** Relación agua cemento concreto con reemplazo del 5% del agregado grueso

Agregado	Agua	Cemento	Arena	Grava	Ladrillo
Masa (kg)	200	432.10	776.74	901.88	47.47
Densidad (kg/m³)	1000	2940	2701	2597	-
Relación	0.463	1.000	1.798	2.087	-

8.11.3 Relación agua cemento concreto con reemplazo del 10% del agregado grueso**Tabla 33** Relación agua cemento concreto con reemplazo del 10% del agregado grueso

Agregado	Agua	Cemento	Arena	Grava	Ladrillo
Masa (kg)	200	432.10	776.74	854.41	94.93
Densidad (kg/m³)	1000	2940	2701	2597	-
Relación	0.463	1.000	1.798	1.977	-

8.11.4 Relación agua cemento concreto con reemplazo del 15% del agregado grueso

Tabla 34 Relación agua cemento concreto con reemplazo del 15% del agregado grueso

Agregado	Agua	Cemento	Arena	Grava	Ladrillo
Masa (kg)	200	432.10	776.74	806.94	142.40
Densidad (kg/m ³)	1000	2940	2701	2597	-
Relación	0.463	1.000	1.798	1.867	-

8.12. Cantidades de especímenes realizados

Tabla 35 Cantidades de cilindros

Cilindros																
Tipo	Con adoquín				Con ladrillo N°4				Con ladrillo				Convencional	Convencional con aditivo	Total	
Porcentaje	5%	10%	15%	Aditivo (10%)	5%	10%	15%	Aditivo (10%)	5%	10%	15%	Aditivo (10%)				
7 días	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	42
14 días	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	42
28 días	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	42
															Σ	126

Tabla 36 Cantidades de viguetas

Viguetas																
Tipo	Con adoquín				Con ladrillo N°4				Con ladrillo				Convencional	Convencional con aditivo	Total	
Porcentaje	5%	10%	15%	Aditivo (10%)	5%	10%	15%	Aditivo (10%)	5%	10%	15%	Aditivo (10%)				
28 días	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	28
															Σ	28

8.13. Cantidades de totales de material

Tabla 37 Cantidades totales de material

Agua (kg)	Cemento (kg)	Arena (kg)	Grava (kg)	Ladrillo triturado			Aditivo (kg)
				#4 (kg)	Adoquín (kg)	Estructural (kg)	
308.73	611.51	1099.24	1230.83	34.03	34.03	34.03	0.78

9. Análisis de resultados

9.1. Ensayo de asentamiento

De acuerdo con el diseño de mezcla realizado, el asentamiento obtenido para las muestras de concreto de la prueba de slump, debía estar entre 5 y 10 cm, es decir, para una consistencia media plástica. La prueba de asentamiento se realizó siguiendo los procedimientos descritos en la NTC 396, en donde se tenía que ser muy cuidadoso con la técnica al realizar el proceso de compactación, humedecer el cono y la superficie, durar poco realizando la prueba y agregar agua adicional por efecto de las condiciones ambientales. Para el caso de las muestras que tuvieron aditivo, las pruebas de asentamiento obtenidas por lo general tenían una consistencia fluida con asentamientos mayores a 20 cm. La Tabla 38 muestra los asentamientos promedios obtenidos teniendo en cuenta el tipo de ladrillo, porcentaje y el aditivo.

Tabla 38 Asentamientos obtenidos

Tiempo curado	Ladrillo #4			Adoquín			Estructural			Convencional	Utilizando aditivo			
	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%		Ladrillo #4	Adoquín	Estructural	Convencional
7 días	5	5	5	7	14	5	6	6	5	5.5	21	23	24	23
14 días	5	5	9	15	5	5	5	6.5	5	14	21	20	7.5	21
28 días	10	10	7	8	7	6.5	5	5	6	5.5	12	22	7	21

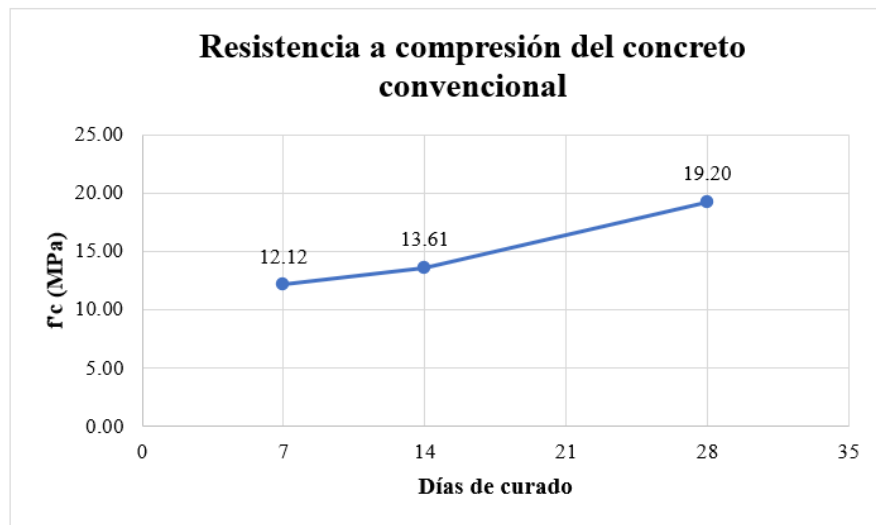
9.2. Resistencia a la compresión

La prueba de resistencia a compresión determina la carga axial máxima a la cual puede estar sometido un espécimen cilíndrico de concreto hasta que se presente la falla. Se realizaron pruebas de resistencia de compresión según el tipo de ladrillo, porcentaje de reemplazo a utilizar y con aditivo. En total se realizaron 126 cilindros de diámetro de 15 cm y altura de 30 cm.

9.2.1 Concreto convencional

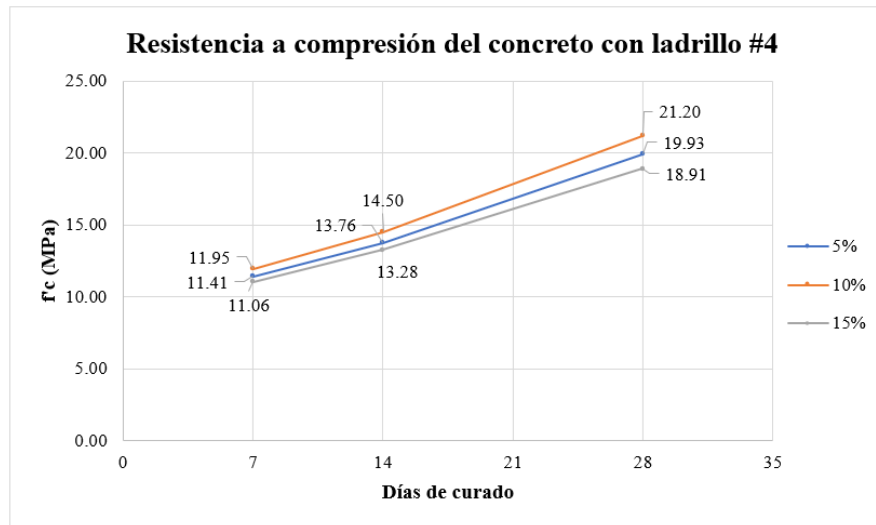
Los cilindros que no tenían ladrillo triturado como reemplazo del agregado grueso fueron diseñados para una resistencia de diseño de 21 MPa, sin embargo, como se muestra en la Figura 18, se obtuvo un valor de resistencia a la compresión a los 28 días de 19.2 MPa, valor que está por debajo de la resistencia de diseño en un 8.57%.

Figura 18 Resistencia a compresión del concreto convencional



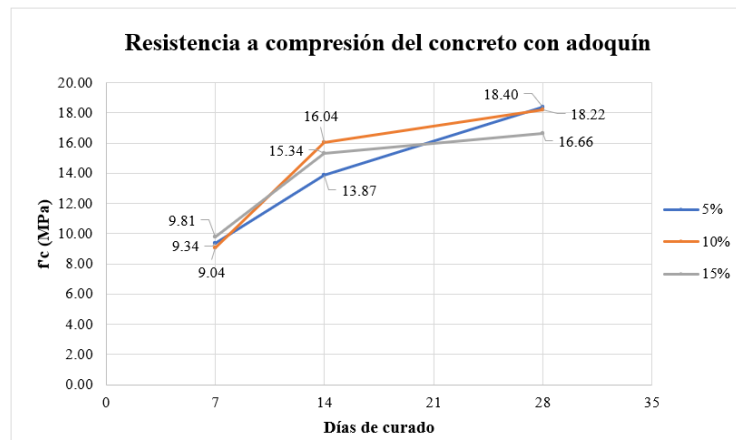
9.2.2 Concreto con ladrillo #4

El reemplazo del 10% del agregado grueso no solo alcanzó la resistencia de diseño, sino que tuvo los mejores resultados de este ladrillo con un aumento en la resistencia a compresión del 10.42% comparándolo con el concreto convencional, valores que confirman la recomendación de Masías Mogollón (2018) de usar el 10% como reemplazo como valor óptimo en la realización de mezclas de concreto con ladrillo triturado, dado que a partir de este porcentaje los valores de resistencia comienzan a disminuir. Esto último se cumplió con el reemplazo del 15% que tuvo los resultados más desfavorables con una disminución en la resistencia del 1.51%, por su parte el reemplazo del 5% tuvo un pequeño aumento del 3.8%. Esto se muestra en la Figura 19.

Figura 19 Resistencia a compresión del concreto con ladrillo #4

9.2.3 Concreto con adoquín

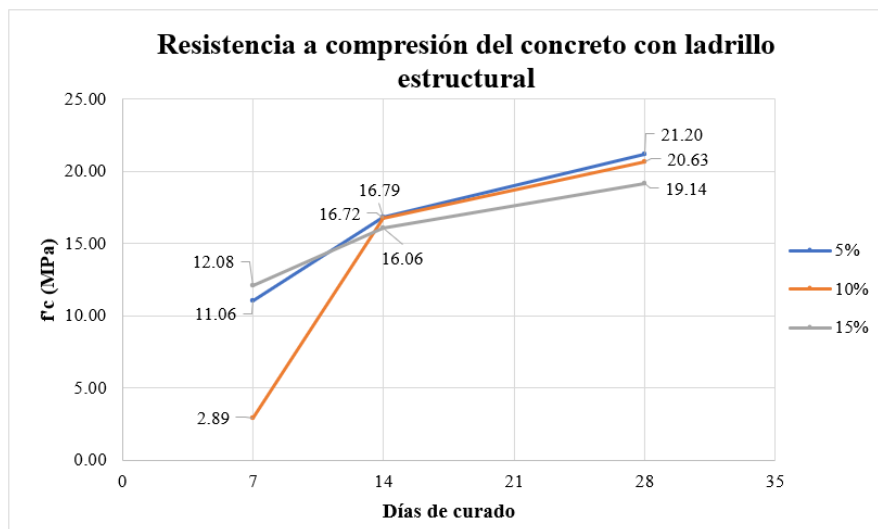
El concreto con adoquín solo obtuvo disminuciones en la resistencia en todos los porcentajes de reemplazo, el 5 y 10% tuvieron los mejores resultados, sin embargo, tuvieron disminuciones del 4.16 y 5.10% respectivamente, por su parte, con el 15% de reemplazo se obtuvo la mayor disminución, la cual fue del 13.23% con respecto a los resultados obtenidos con el concreto convencional. Los bajos valores de resistencia se dan debido a la estructura porosa de este ladrillo, lo que explica su alto porcentaje de absorción, y la mala cohesión que este tiene con los agregados de la mezcla. Esto se dilucida en la Figura 20.

Figura 20 Resistencia a compresión del concreto con adoquín

9.2.4 Concreto con ladrillo estructural

Al igual que el concreto con adoquín, el 5% y 10% tuvieron resultados similares, sin embargo el ladrillo estructural al tener una consistencia más homogénea y resistente, obtuvo mejores resultados, esto debido a que el 5% de reemplazo alcanzó la resistencia de diseño y presentó un aumento del 10.41%, por su parte el 10% también obtuvo un aumento en la resistencia pero del 7.45%, no obstante el 15% tuvo una leve disminución del 0.31% comparando los resultados con el concreto sin reemplazo del agregado grueso. Por otro lado, la resistencia a los 7 días del 10% tuvo un comportamiento atípico debido a la baja resistencia obtenida, sin embargo, al pasar el tiempo la resistencia mejoró considerablemente. A continuación, se muestra la Figura 21.

Figura 21 Resistencia a compresión del concreto con ladrillo estructural

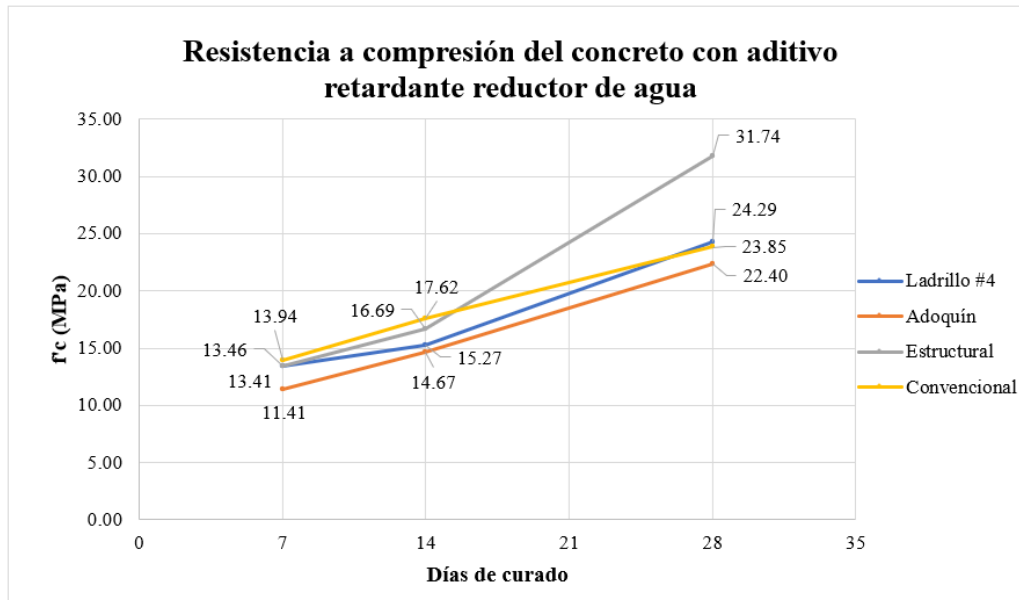


9.2.5 Concreto con aditivo

Como se mencionó anteriormente, se quería evaluar el comportamiento del concreto con ladrillo utilizando un aditivo retardante reductor de agua, dado que el ladrillo al ser poroso absorbe agua y el aditivo contrarresta este efecto y mejora otras propiedades como la resistencia, manejabilidad, la segregación, entre otras. Con respecto a la dosis utilizada se usaron 250 g de aditivo por 50 kg de cemento y se aplicaron en un 10% del agua de mezclado, de igual manera, el porcentaje de reemplazo de ladrillo fue del 10%. El aditivo fue utilizado en concretos con ladrillo

#4, adoquín, ladrillo estructural y también en mezclas de concreto convencional. La Figura 22 muestra los resultados obtenidos de las resistencias a compresión para los concretos con aditivo.

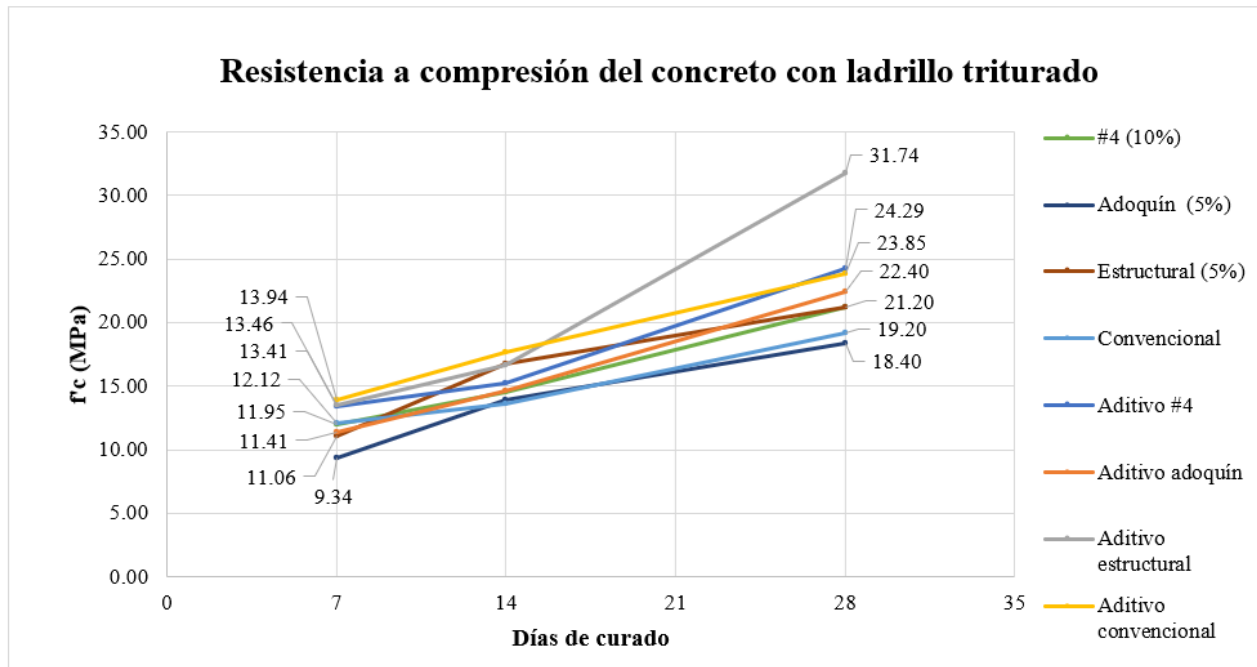
Figura 22 Resistencia a compresión del concreto con aditivo retardante reductor de agua



Todos los concretos a los que se les agregó aditivo, obtuvieron resistencias mayores al concreto convencional sin aditivo, y alcanzaron con creces la resistencia especificada de diseño de 21 MPa. El mejor comportamiento lo obtuvo el concreto con ladrillo estructural, al presentar una resistencia de 31.74 MPa, y un aumento en la resistencia compresión del 65.31% con respecto al concreto convencional con aditivo, y un aumento del 33.08% comparándolo con el concreto convencional con aditivo. Las demás resistencias tuvieron comportamientos similares como es el caso del ladrillo #4, el concreto convencional y con adoquín.

9.2.6 Comparación de los mejores resultados para cada tipo de ladrillo

El ladrillo #4 obtuvo los mejores resultados con un reemplazo del 10%, el adoquín y el ladrillo estructural por su parte tuvieron los mejores reemplazando un 5%, y los concretos con aditivo, todos tuvieron buenos resultados. A continuación, en la figura se muestra el comportamiento de estos resultados.

Figura 23 Resistencia a compresión del concreto con ladrillo triturado

Como se puede ver en la Figura 23, los mejores resultados los tuvo las mezclas con aditivo debido a la mejora de las características que tiene usar este tipo de sustancias en el concreto, luego le sigue el ladrillo estructural en un reemplazo del 5%, el ladrillo #4 en un 10%, el concreto convencional y por último el concreto con adoquín.

9.3. Deformaciones verticales

Se realizó la medición de las deformaciones verticales de los cilindros con un deformímetro, estas se muestran a continuación en la Tabla 39.

Tabla 39 *Deformaciones verticales*

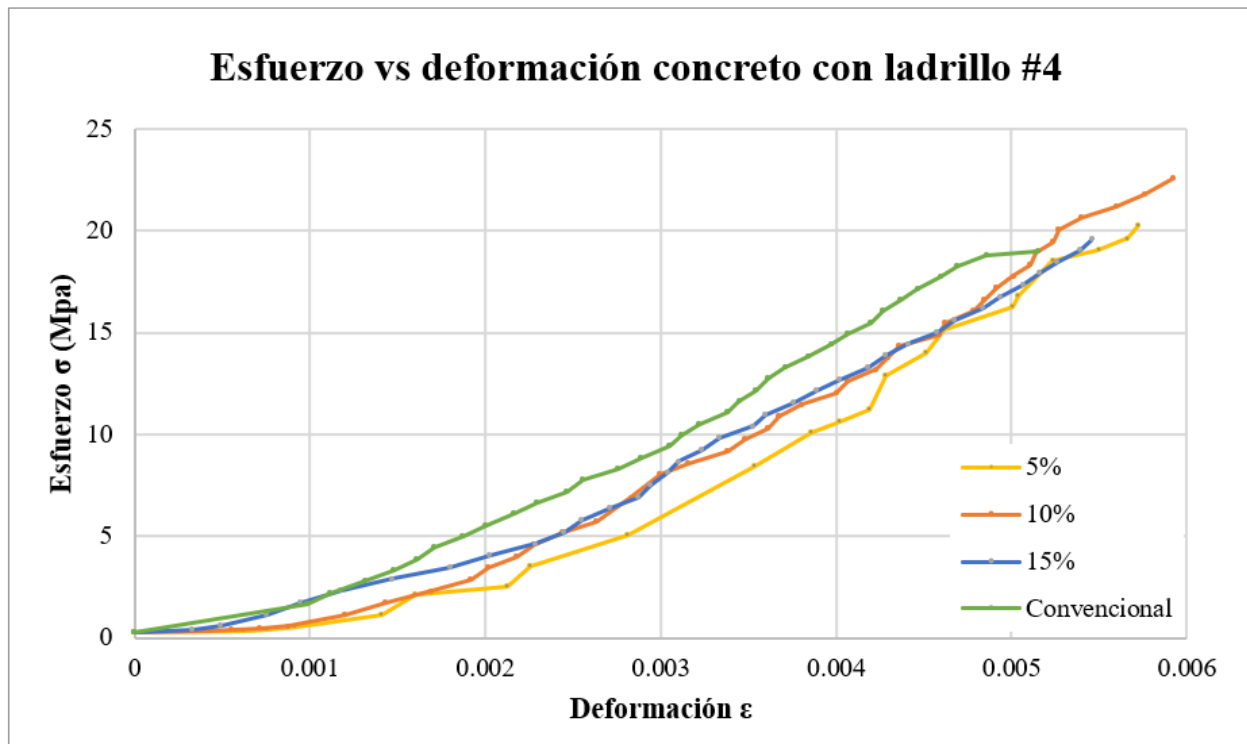
Tiempo curado	Ladrillo #4			Adoquín			Estructural			Convencional	Utilizando aditivo (10% ladrillo)			
	5%	10%	15%	5%	10%	15%	5%	10%	15%		Ladrillo #4	Adoquín	Estructural	Convencional
7	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.003	0.003	-	0.003	0.003	0.004	0.005	0.004	0.004
14	0.005	0.005	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
28	0.007	0.006	0.006	0.005	0.005	0.005	0.004	0.006	0.005	0.005	0.006	0.006	0.007	0.005

Como se mencionó en el apartado 5.1.9, la deformación unitaria para un concreto de peso normal a los 28 días de curado está en el rango de 0.002 a 0.003, sin embargo, en la presente investigación se tuvieron valores mayores, esto puede ser debido a que el concreto tiene agregados reciclados y por errores mínimos en las mediciones. Se graficaron las curvas de esfuerzo vs deformación para todos los tipos de concreto a los 28 días de curado, para comparar con los valores obtenidos, estos se muestran a continuación.

9.3.1 Concreto con ladrillo #4

Como se muestra en la Figura 24, los concretos con reemplazo de ladrillo #4 presentaron mayores deformaciones, debido a que estos utilizan agregados reciclados a comparación con el concreto convencional. El 10 % de agregado grueso obtuvo las mejores resistencias, pero tuvo las mayores deformaciones, el 5% obtuvo un comportamiento parecido, pero con menor resistencia, por otro lado, el 15% tuvo un comportamiento de resistencia equiparable al convencional, pero con menor deformación. Por lo cual, el concreto con reemplazo del 15% obtuvo un comportamiento más balanceado de todos los concretos.

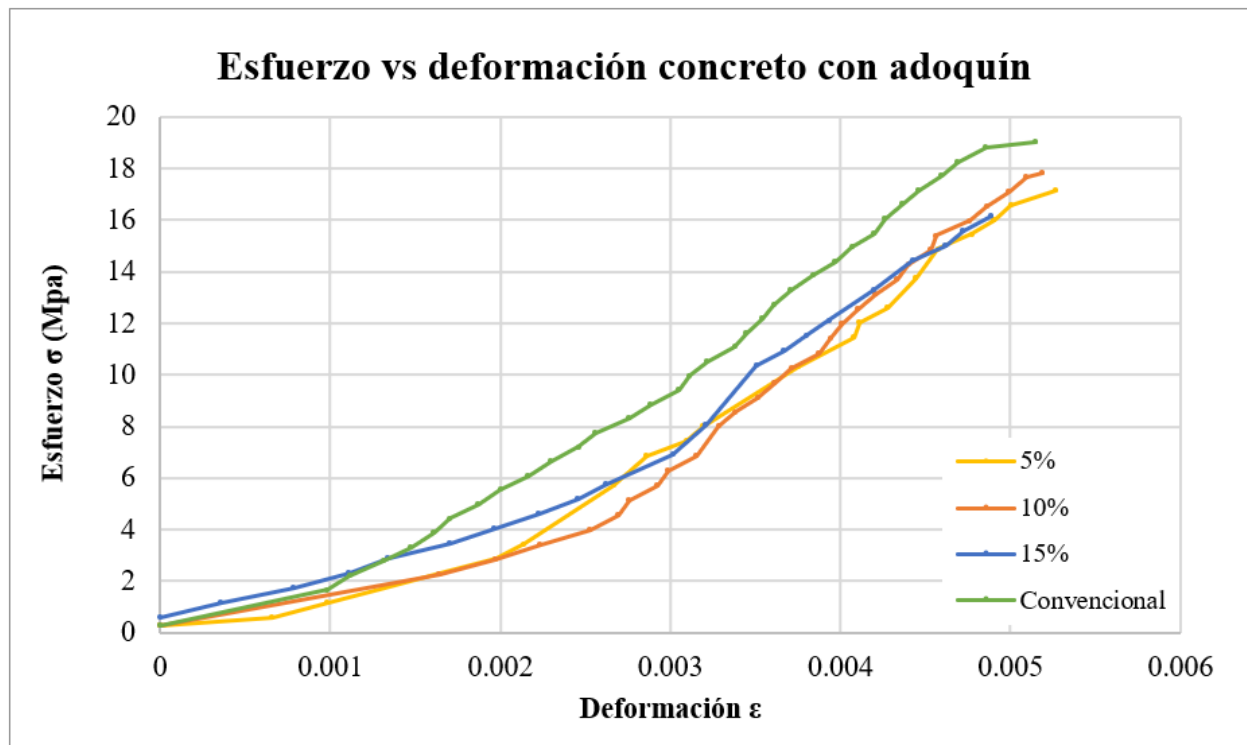
Figura 24 Esfuerzo vs deformación concreto con ladrillo #4



9.3.2 Concreto con adoquín

Los concretos con reemplazo de adoquín en el porcentaje de 5 y 10%, presentaron comportamientos parecidos en cuanto a deformación, con respecto al concreto convencional, en cambio, el 15% de reemplazo tuvo menor deformación y resistencia que los otros concretos. Es válido afirmar que el concreto con adoquín no tiene un comportamiento mejor que el concreto convencional en ninguno de los porcentajes a nivel de resistencia a la compresión y a deformaciones verticales. Esto se muestra en la Figura 25.

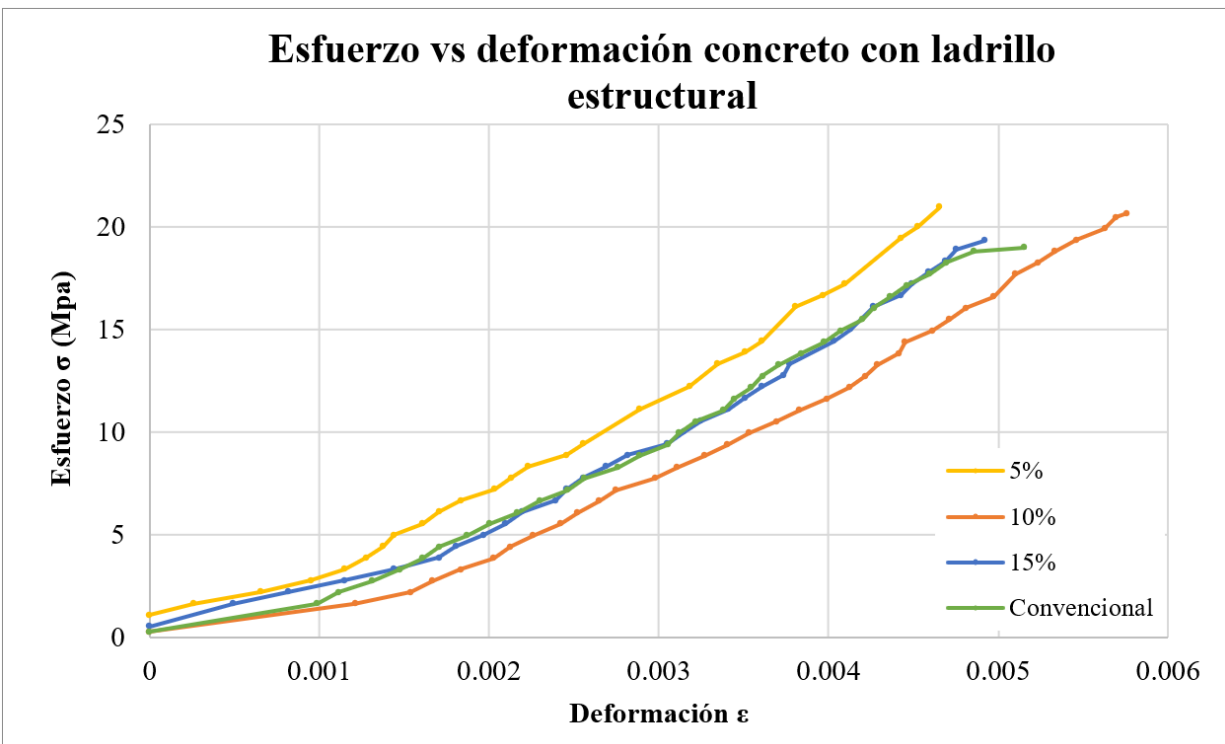
Figura 25 Esfuerzo vs deformación concreto con adoquín



9.3.3 Concreto con ladrillo estructural

Como se muestra en la Figura 26, el concreto con reemplazo del 10 % presentó una deformación mayor que los otros concretos, por otro lado, el 5 y 15% tuvieron menores deformaciones y una resistencia mayor que el concreto convencional, esto último refleja que estas mezclas tienen un buen comportamiento elástico ante las cargas de compresión impuestas durante los ensayos. Así mismo, es válido afirmar que los rangos elásticos de los concretos modificados con ladrillo estructural son más grandes que el del concreto convencional, lo cual significa que tienen una capacidad mayor de deformarse y recuperar su forma.

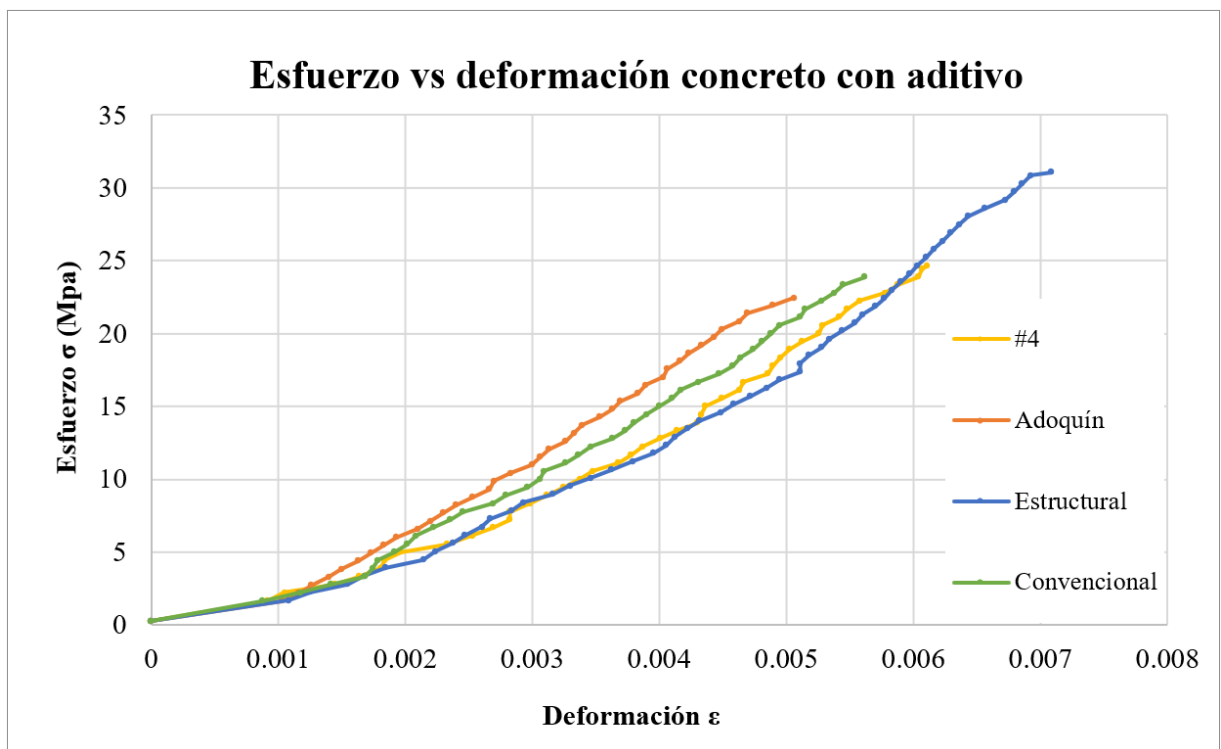
Figura 26 Esfuerzo vs deformación concreto con ladrillo estructural



9.3.4 Concreto con aditivo

Los concretos con reemplazo del 10% del agregado grueso y a los que se adicionó el aditivo retardante reductor de agua tuvieron un comportamiento diverso, en cuanto a que el concreto con ladrillo estructural y #4 presentaron las mayores deformaciones y resistencia a la compresión, en cambio, el concreto con adoquín tuvo la menor deformación y resistencia a la compresión de todos los concretos a los que se les adicionó aditivo.

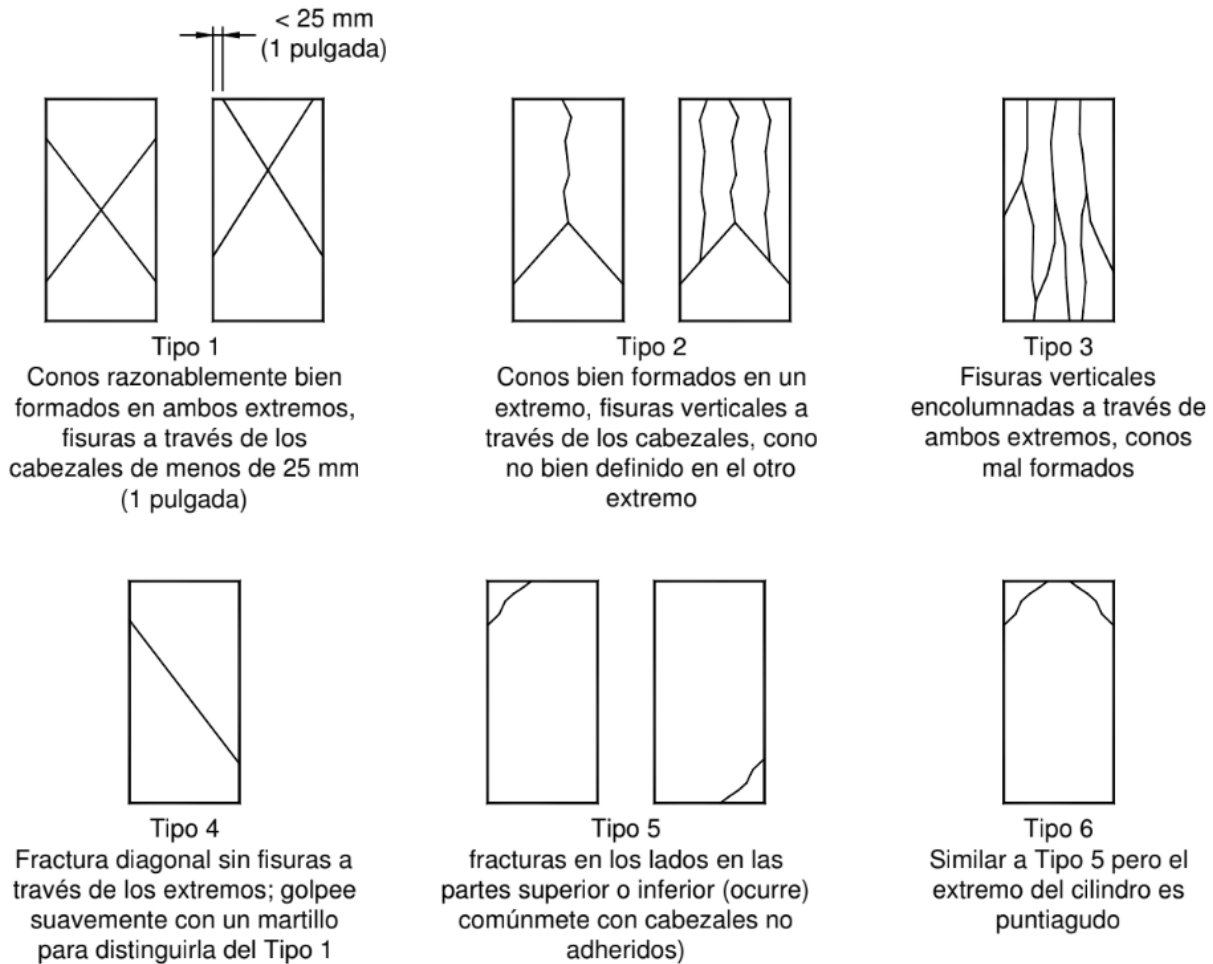
Figura 27 Esfuerzo vs deformación concreto con aditivo



9.4. Tipos de falla de los cilindros

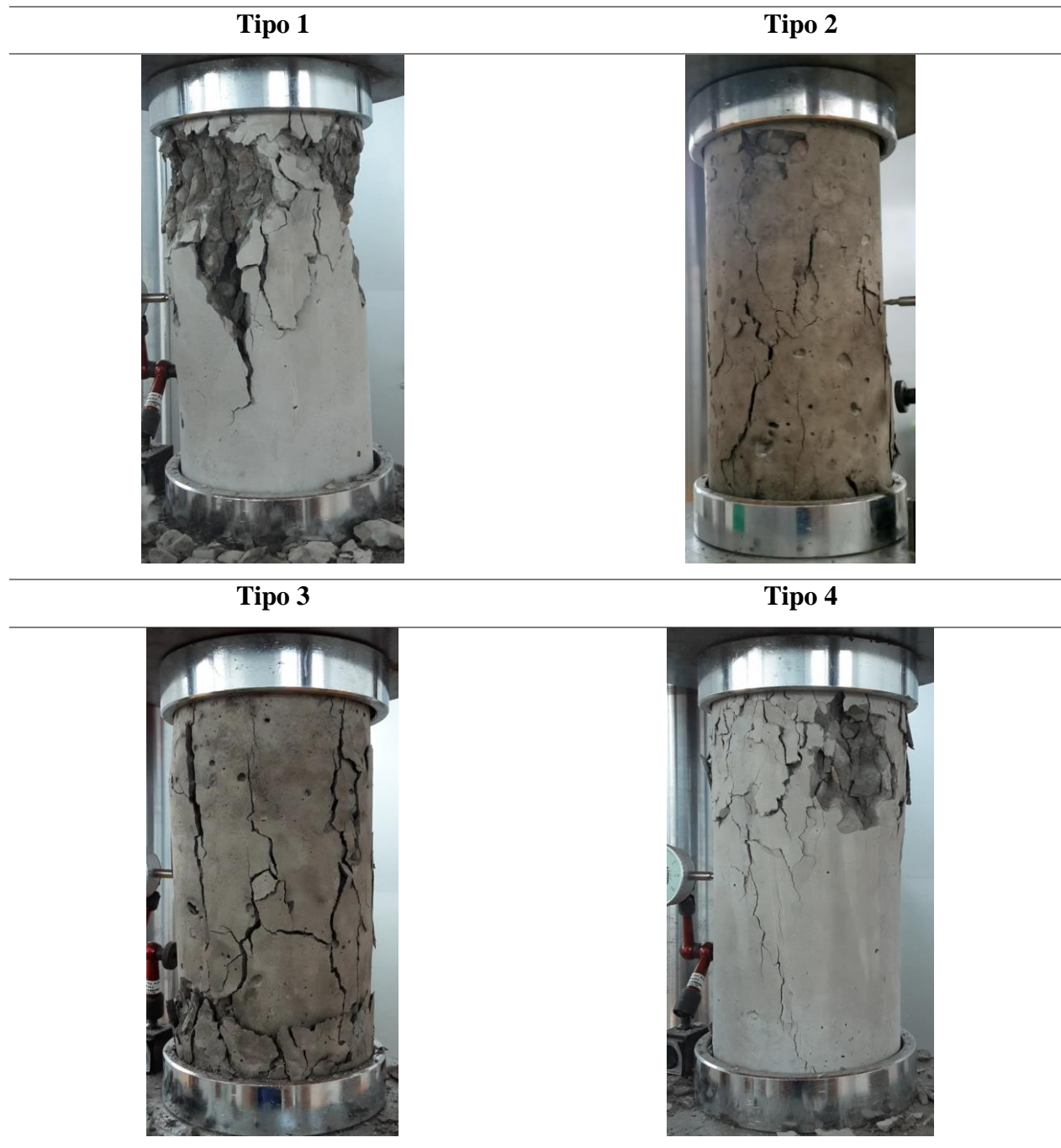
De acuerdo con la NTC 673, los tipos de falla que pueden presentarse en los cilindros de concreto pueden ser los siguientes:

Figura 28 Esquema de los modelos de fractura típicos



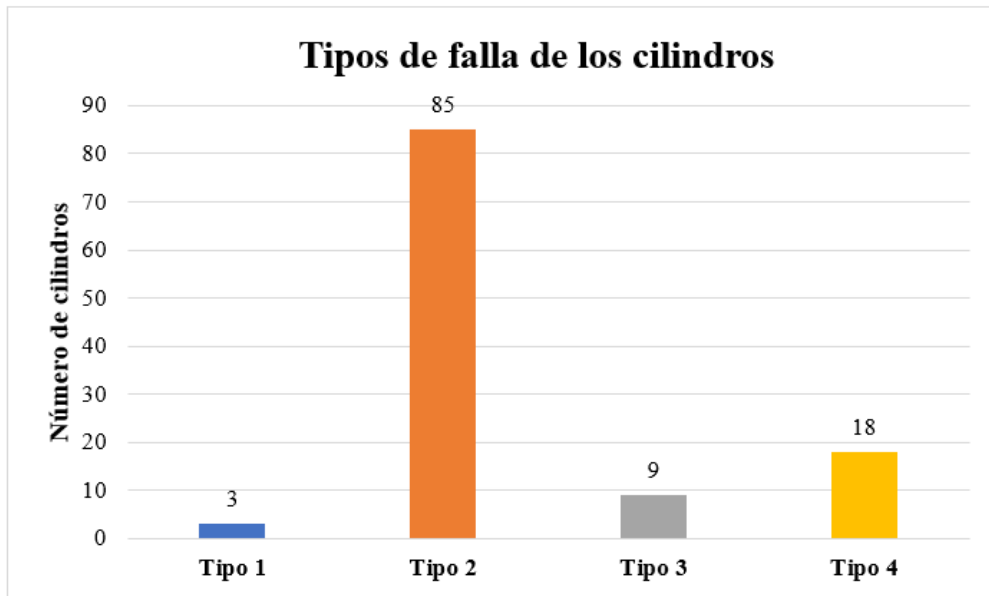
Nota. Adaptado de NTC 673.

Sin embargo, en la presente investigación solo se presentaron los primeros 4 tipos de falla, la Tabla 40 muestra los tipos de falla que se presentaron.

Tabla 40 *Tipos de falla*

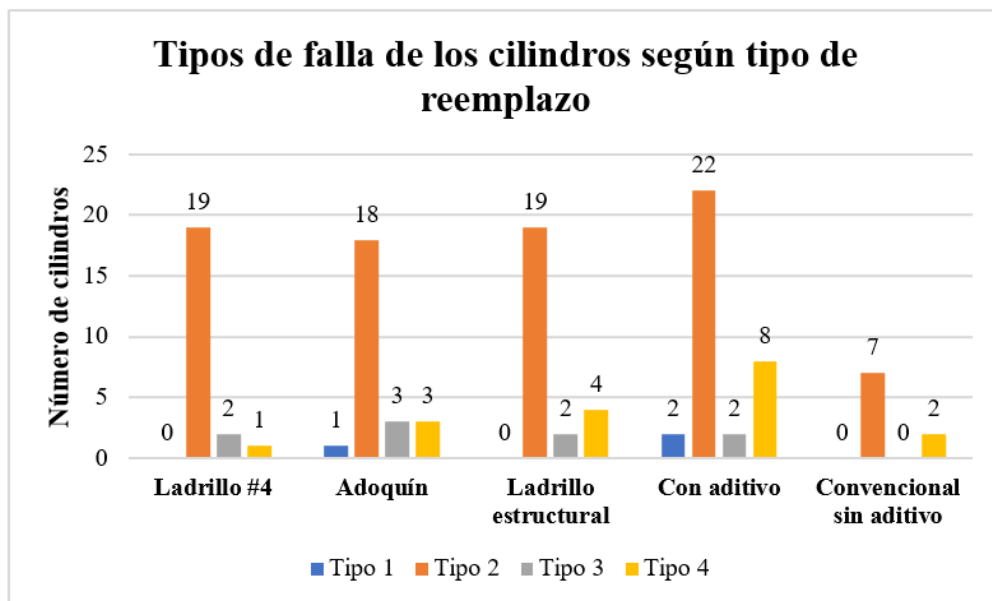
El tipo de falla más común que se presentó fue el tipo 2 o también llamada falla de cono, ya que se presentó en aproximadamente un 73.9% de las muestras, luego le sigue la falla tipo 4 con un 15.6%, posteriormente la falla tipo 3 con 7.8% y por último la falla tipo 1 con 2.6%. Esto se muestra en la Figura 29.

Figura 29 Tipos de falla de los cilindros



Los tipos de falla en los cilindros según el tipo de ladrillo también conservan el mismo comportamiento general, debido a que la falla tipo 2 es la que más se presentó en todas las categorías, esto se dilucida en la Figura 30.

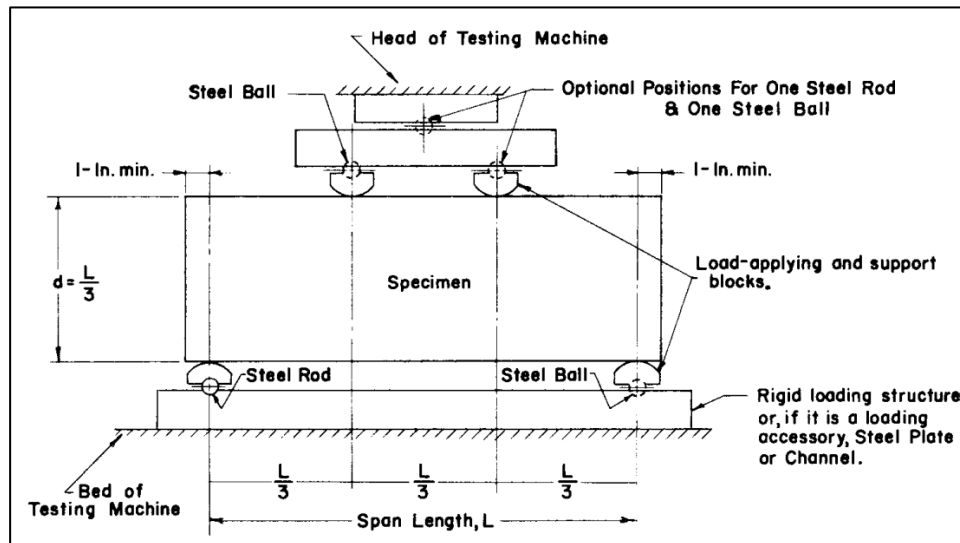
Figura 30 Tipos de falla de los cilindros según tipo de reemplazo



9.5. Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión del concreto, también se conoce como módulo de rotura, se evalúa sometiendo una vigueta estándar a flexión, cargada en el tercio medio hasta que esta se parta a la mitad; el ensayo se describe en la NTC 2871 y ASTM C78. La Figura 31 muestra el procedimiento.

Figura 31 *Ensayo de flexión*



Nota: Adaptado de American Society for Testing and Materials (2022).

El cálculo del módulo de rotura se realiza con la Ecuación 4 para el caso de que la falla sea en el centro de luz de la viga.

Ecuación 4 *Módulo de rotura*

$$MR = \frac{PL}{bd^2}$$

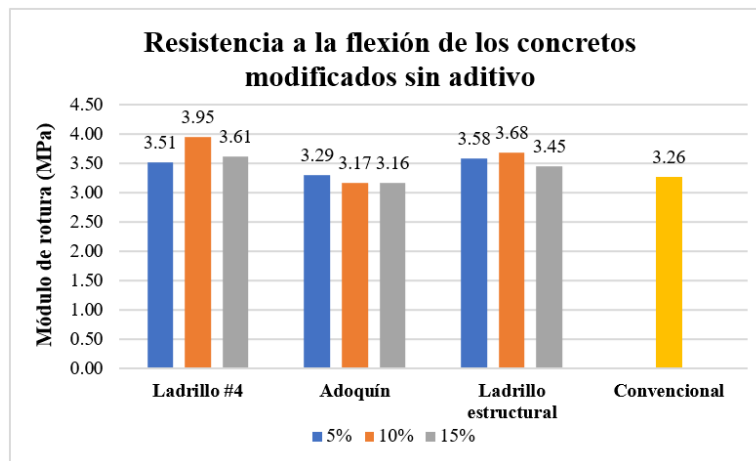
Nota: Adaptado de American Society for Testing and Materials (2022).

Donde, P es la carga máxima aplicada por la máquina de testeo, L es la longitud de la viga, b es el ancho de la viga, y d es la altura de la viga.

9.5.1 Resistencia a la flexión de los concretos modificados sin aditivo

La Figura 32 muestra los resultados de resistencia flexión de las viguetas con ladrillo triturado sin aditivo, en donde, se aprecia que el ladrillo #4 y el ladrillo estructural obtuvieron los mejores resultados de módulo de rotura, más específicamente, para los porcentajes de 10% de reemplazo del agregado grueso, por otro lado, como era de esperarse, el ladrillo adoquín tuvo los resultados más desfavorables a flexión en donde solo el 5% de reemplazo tuvo un aumento en la resistencia a flexión con respecto al concreto convencional. Estos resultados concuerdan con el comportamiento general que tuvieron los cilindros a compresión en donde, los mejores resultados los obtuvo el ladrillo #4 y el ladrillo estructural.

Figura 32 Resistencia a la flexión de los concretos modificados sin aditivo

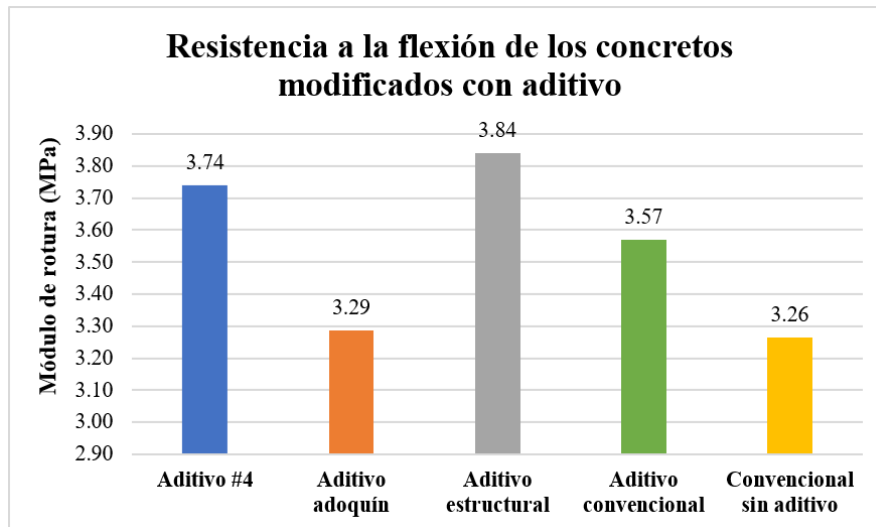


9.5.2 Resistencia a la flexión de los concretos modificados con aditivo

Como se ya se ha visualizado, la utilización del aditivo mejora las propiedades del concreto, en el caso de la flexión, hubo incrementos en el módulo de rotura para todas las mezclas utilizando el 10% de reemplazo, el mejor comportamiento lo obtuvo el ladrillo estructural con aditivo, alcanzando una resistencia de 3.84 MPa, que se traduce en un aumento del 17.79% con respecto al concreto convencional y del 7.56% comparándolo con el concreto convencional con aditivo. En segundo lugar, se encuentra el ladrillo #4 que obtuvo una resistencia 3.74 MPa, y por último el ladrillo adoquín que tuvo un ínfimo aumento en la resistencia del 0.92% con respecto al concreto

convencional pero una disminución del 7.84% comparándolo con el concreto convencional con aditivo. Cabe destacar que el ladrillo #4 y el ladrillo estructural tuvieron mejores resultados que las mezclas sin aditivo sin tener en cuenta al concreto con un reemplazo del 10% de ladrillo #4 sin aditivo, que tuvo el mayor módulo de rotura de todas las mezclas realizadas con o sin aditivo.

Figura 33 Resistencia a la flexión de los concretos modificados con aditivo



Conclusiones

De la investigación realizada se concluye lo siguiente:

El concreto modificado con adoquín, presentó los resultados más desfavorables tanto a compresión como a flexión, dado que se obtuvieron disminuciones con respecto al concreto convencional. A pesar de que este ladrillo posee una gran resistencia a compresión para transporte peatonal y vehicular liviano, al ser triturado y reemplazar parte del agregado grueso, su comportamiento en la mezcla de concreto no es el mejor, ya que su consistencia no es tan homogénea lo que se traduce en mayor porosidad y absorción de agua.

Por otra parte, los concretos con ladrillo #4 y estructural mejoraron las propiedades físico-mecánicas del concreto, en el cual, el primero tuvo los mejores resultados tanto a flexión como a compresión con el porcentaje del 10%, lo que confirma la afirmación de Masías Mogollón (2018). Con respecto al concreto con ladrillo estructural, a nivel de resistencia a compresión el mejor porcentaje a utilizar es el 5%, sin embargo, a flexión se recomienda utilizar el 10% de reemplazo. Estos resultados están dados en gran medida a las características propias de los ladrillos, los cuales, tienden a tener una consistencia más homogénea, lo que los lleva a presentar menos porosidad, y absorción de agua, además de que, al ser triturados, las partículas resultantes poseen una forma angulosa con una textura rugosa lo que genera una mayor adherencia con la pasta.

El empleo del aditivo retardante reductor de agua Eucon WR 60 representó mejorías en las resistencias tanto para el concreto convencional como para los modificados, lo que se evidencia al notar que todos los especímenes en los que se aplicó el aditivo superaron la resistencia de diseño a la compresión de 21 MPa, además, el mejor comportamiento frente al uso del reductor de agua lo presenta el concreto modificado con ladrillo estructural, que tuvo una resistencia a la compresión de 31.74 MPa, equivalente a una mejoría del 65.31% en la resistencia frente al concreto convencional. Con respecto a la resistencia a la flexión, los mejores resultados de resistencia se presentaron nuevamente para el ladrillo #4 y el estructural, con resistencias de 3.74 MPa y 3.84 MPa respectivamente, frente a los 3.57 MPa presentados por el concreto convencional, en donde el concreto con adoquín no presentó resultados relevantes al utilizar el aditivo.

Además, los valores de deformación presentados fueron mayores a 0.003 que pueden ser debidos a la utilización de agregados no convencionales y a posibles errores en las mediciones con

los equipos, de igual manera, el conjunto de datos obtenido no exhibe un comportamiento con una tendencia específica según el tipo de ladrillo o porcentaje utilizado.

Referencias bibliográficas

- Abanto Castillo, F. (2009). *Tecnología del concreto (teoría y problemas)*.
<https://www.scribd.com/doc/306087568/Tecnologia-Del-Concreto-Flavio-Abanto>
- Adamson, M., Razmjoo, A., y Poursaee, A. (2015). Durability of concrete incorporating crushed brick as coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 94, 426–432.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.056>
- Agencia Nacional de Minería. (2023, abril 8). *Así es nuestra Colombia minera*.
<https://www.anm.gov.co/?q=Asi-es-nuestra-Colombia-minera>
- Aliabdo, A. A., Abd-Elmoaty, A.-E. M., y Hassan, H. H. (2014). Utilization of crushed clay brick in concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*, 53(1), 151–168.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.12.003>
- American Concrete Institute. (1991). *ACI 116 - Terminología del cemento y el hormigón*.
<https://www.inti.gob.ar/publicaciones/descargac/270>
- American Concrete Institute. (2001). *ACI 201 - Durabilidad del concreto*.
<https://www.inti.gob.ar/publicaciones/descargac/218>
- American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM C219 – 14a standard Terminology Relating to Hydraulic Cement*. <https://doi.org/10.1520/C0219-14A>
- American Society for Testing and Materials. (2022). *ASTM C 78 - Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*.
<https://normanray.files.wordpress.com/2010/10/kuliah-7-c78.pdf>
- Argos. (2020). *Ficha técnica cemento gris uso general*. <https://colombia.argos.co/wp-content/uploads/2020/09/FT-CEMENTO-GRIS-USO-GENERAL-2019-2.pdf>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica - AIS. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR 10, Título C*.
http://www.uptc.edu.co/export/sites/default/facultades/f_ingenieria/pregrado/civil/documentos/NSR-10_Titulo_C.pdf
- ASTM. (2017). *ASTM C989/C989M–17 Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars*. https://doi.org/10.1520/C0989_C0989M-17

- Atyia, M. M., Mahdy, M. G., y Abd Elrahman, M. (2021). Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, 304, 124655. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124655>
- Baño Nieva, A. (2005). *Guía de construcción sostenible*. <https://istas.net/descargas/CCConsSost.pdf>
- Barrera Silva, N. (2015). Efectos ambientales y sociales de la minería y las curtiembres: dos escenarios estratégicos en la cuenca media del río Tunjuelo. *Institución Universitaria de Envigado*, 19, 181. <https://doi.org/10.25057/25005731.494>
- Beltrán Quimbayo, J. P., y Cuesta Alvarado, C. M. (2019). *Análisis mineralógico, norma INVIAS: 2013, de los agregados pétreos de canteras procedentes de los municipios de Villavicencio y Acacías para su aplicación en mezclas asfálticas en caliente en el departamento del Meta. [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio*. <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/19453>
- Bermúdez Hernández, R. D. (2021). *Evaluación de la resistencia a la compresión de un concreto con la sustitución de residuos de construcción y demolición como agregado grueso. [Trabajo de grado, Universidad de la Costa]. Repositorio*. <https://repository.cuc.edu.co/handle/11323/8174>
- Betancourt León, J. E., y Solaque Velasco, Y. E. (2018). *Análisis del impacto ambiental generado por la explotación de material de arrastre en el río Guatiquia en el municipio de Villavicencio – Meta: caso Mina Guatiquia Centro. S.A.S. [Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio*. <https://repository.ucc.edu.co/items/9094ef07-c266-45b1-bd5e-a4d2e763c18c>
- Cabral, A. E. B., Schalch, V., Molin, D. C. C. D., y Ribeiro, J. L. D. (2010). Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 24(4), 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.011>
- CEPAL. (2016). *La extracción mundial de materiales se triplicó en cuatro décadas y agudiza el cambio climático y la contaminación atmosférica | Comisión Económica para América Latina y el Caribe*. <https://www.cepal.org/es/comunicados/la-extraccion-mundial-materiales-se-triplico-cuatro-decadas-agudiza-cambio-climatico-la>

- Congreso de la República de Colombia. (1994). Ley 142 de 1994. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=2752>
- Congreso de la República de Colombia. (2001). Ley 685 del 2001. Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones.
<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=9202>
- Cortes Gomez, E. A., y Perilla Sastoque, J. E. (2014). *Estudio comparativo de las características físico-mecánicas de cuatro cementos comerciales Portland Tipo I*. [Trabajo de grado, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio.
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/11044/ESTUDIO;jsessionid=0571AF8F8CD47167AC13B4831F3AF3FB?sequence=1>
- Debieb, F., y Kenai, S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials*, 22(5), 886–893.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013>
- Distriarcillas. (s/f). *Ladrillo estructural*. Recuperado el 7 de abril de 2023, de <https://distriarcillas.com/producto/ladrillo-portante-prisma/>
- El Trebol Ladrillera. (s/f). *Estructural No. 4*. Recuperado el 5 de abril de 2023, de <https://ladrilleraeltrebol.com/bloque-estructural-4/>
- Euclid Chemical Toxement. (2021). *Eucon WR 60*.
<https://www.toxement.com.co/media/5744/eucon-wr-60.pdf>
- European Thematic Network. (2000). Use of recycled materials as aggregates in the construction industry. *Recycling in construction*, 2(3).
https://books.google.com.co/books/about/Use_of_Recycled_Materials_as_Aggregates.html?id=4CdIMwEACAAJ&hl=en&redir_esc=y
- Gamboa García, D. E. (2015). Valoración de impactos ecológicos por minería de oro en río Guabas, Valle del Cauca, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental UNAD*, 6.
<https://doi.org/https://doi.org/10.22490/21456453.1420>
- Google Maps. (2023a). *Ubicación Cantera río Guayuriba*.
<https://maps.app.goo.gl/U4oSJracqUsdxLfN9>
- Google Maps. (2023b). *Ubicación de la Universidad Santo Tomás Villavicencio*.
<https://maps.app.goo.gl/p11UrmbxyEhSBfMc6>

- Hansen, T. C. (1992). *Recycling of Demolished Concrete and Masonry*. Taylor & Francis Group.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781482267075>
- Herrera Durán, N. (2015). 'No le saque la piedra a la montaña'. *El Espectador*.
<https://www.elespectador.com/noticias/bogota/no-le-saque-la-piedra-a-la-montana/>
- Iberdrola. (2021). *La población mundial | Evolución histórica y causas - Iberdrola*.
<https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/evolucion-poblacion-mundial>
- Ingeniería y arquitectura aplicadas. (s/f). *EUCON WR 60*. Recuperado el 7 de abril de 2023, de
<https://iaarquitectura.com/producto/eucon-wr-60/>
- Khaloo, A. R. (1994). Properties of Concrete Using Crushed Clinker Brick as Coarse Aggregate. *ACI Materials Journal*, 91(4). <https://doi.org/10.14359/4058>
- Kisku, N., Joshi, H., Ansari, M., Panda, S. K., Nayak, S., y Dutta, S. C. (2017). A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 131, 721–740.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.029>
- Kosmatka, S. H., y Wilson, M. L. (2011). *Design and control of concrete mixtures: the guide to applications, methods, and materials*. Portland Cement Association.
https://www.researchgate.net/profile/Steven-Kosmatka/publication/284663491_Design_and_Control_of_Concrete_Mixtures/links/5655d8f908aefe619b1c5f2b/Design-and-Control-of-Concrete-Mixtures.pdf
- Ladrillera Santafé. (s/f). *Adoquín Cuarto 26 Terracota*. Recuperado el 7 de abril de 2023, de
<https://www.santafe.com.co/productos/adoquines/cuarto-26/adoquin-cuarto-26-terracota/>
- Ladrillera Santafé. (s/f). *Ficha técnica adoquín cuarto 26*. Recuperado el 7 de abril de 2023, de
<https://www.santafe.com.co/wp-content/uploads/2021/11/FT-AD426-TL.pdf>
- Ladrillera Santafé. (s/f). *Ficha técnica ladrillo #4*. Recuperado el 7 de abril de 2023, de
<https://www.santafe.com.co/wp-content/uploads/2021/11/FT-BL4.pdf>
- Ladrillera Santafé. (s/f). *Ficha técnica ladrillo portante 30*. Recuperado el 7 de abril de 2023, de
<https://www.santafe.com.co/wp-content/uploads/2021/11/FT-LPOR30-LPOR30M-1.pdf>
- Lage, I., Abella, F., Vázquez-Herrero, C., y Pérez, J. (2012). Properties of plain concrete made with mixed recycled coarse aggregate. *Construction and Building Materials*, 37, 171–176.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.045>

- Lloyd, N. A., y Rangan, B. V. (2010). *Geopolymer concrete: A review of development and opportunities*. 25–27. <http://cipremier.com/100035037www.cipremier.com>
- Mamlouk, M. S., y Zaniewski, J. P. (2011). *Materials for civil and construction engineers*. <http://worksaccounts.com/wp-content/uploads/2020/08/Materials-for-Civil-and-Construction-Engineering.pdf>
- Masías Mogollón, K. A. (2018). Resistencia a la flexión y tracción en el concreto usando ladrillo triturado como agregado grueso. *Universidad de Piura*. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3484>
- Matallana Rodríguez, R. (2019). *El concreto fundamentos y nuevas tecnologías*. Corona. <https://concreto.com/wp-content/uploads/2023/02/EL-CONCRETO-Fundamentos-y-nuevas-tecnologias..pdf>
- Mccormac, J. (2018). *Diseño de Concreto reforzado*. Alfaomega Grupo Editor. https://www.academia.edu/38487980/Dise%C3%B1o_de_Concreto_Reforzado_Jack_C_McCormac_Russell_H_Brown_8Ed
- Milenioscuro. (2012, abril 21). *Archivo:Colombia - Meta - Castilla la Nueva.svg*. https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Colombia_-_Meta_-_Castilla_la_Nueva.svg
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución No. 0472 del 28 de febrero de 2017. Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de construcción y demolición – RCD y se dictan otras disposiciones. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-0472-de-2017/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). Documento técnico de soporte de la norma por la cual se modifica la resolución 0472 de 2017 sobre la Gestión Integral de Residuos de Construcción y Demolición – RCD y se adoptan otras disposiciones. <https://www.andi.com.co/Uploads/DTS%20Mod%20RES%20472%202017%20RCD%20AJsept17.pdf>
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). Resolución No. Del 25 de noviembre de 2014. Por la cual se adopta la metodología para la formulación, implementación, evaluación, seguimiento, control y actualización de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos. <https://www.minvivienda.gov.co/sites/default/files/2020-08/resolucion-754-de-2014.pdf>

- Monteiro, P. (2006). *Concrete, Microstructure, Properties and Materials* (Tercera). The McGraw-Hill Companies, Inc. <https://doi.org/10.1036/0071462899>
- Moreno Anselmi, L., Ospina García, M., y Rodríguez, K. (2019). Propiedades mecánicas del concreto fabricado con agregados reciclados extraídos de escombros de mampuestos de arcilla cocida. *Espacios*, 40, 12. <https://www.revistaespacios.com/a19v40n04/a19v40n04p12.pdf>
- Nawy, E. (2008). *Concrete Construction Engineering Handbook Second Edition*. CRC press. <https://www.gacbe.ac.in/images/E%20books/Concrete%20Construction%20Engineering%20Handbook,%202nd%20Editionbbbb.pdf>
- Nilson, A. (1999). *Diseño de estructuras de concreto* (12a ed.). <https://marodyc.files.wordpress.com/2014/06/disec3b1o-de-estructuras-de-concreto-nilson-arthur.pdf>
- Niño Hernández, J. (2010). Tecnología del concreto - tomo 1 - materiales, propiedades y diseño de mezclas. En 2010 (Tercera). Asocreto. http://www.asocretovirtual.com/tienda-virtual/index.php?route=product/product&product_id=71
- Pacheco-Torgal, F., y Jalali, S. (2010). Reusing ceramic wastes in concrete. *Construction and Building Materials*, 24(5), 832–838. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.023>
- Paul, S. C. (2017). Data on optimum recycle aggregate content in production of new structural concrete. *Data in Brief*, 15, 987–992. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.dib.2017.11.012>
- Perera, A. G., y Dionisio, M. D. P. S. (2016). Alternatives pour la réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO₂) dans la production de ciment. Proposition d'un modèle d'évaluation. *Innovar*, 26(60), 51–66. <https://doi.org/10.15446/innovar.v26n60.55532>
- Poon, C.-S., y Chan, D. (2007). The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. *Resources, Conservation and Recycling*, 50(3), 293–305. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.06.005>
- Presidencia de la República de Colombia. (2016). Decreto 1666 de 2016. Por el cual se adiciona el Decreto Único Reglamentario del Sector Administrativo de Minas y Energía, 1073 de 2015, relacionado con la clasificación minera. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77883>

- Presidencia de la República de Colombia. (2013). Decreto 2981 de 2013. Por el cual se reglamenta la prestación del servicio público de aseo. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=56035>
- Rashid, M., Hossain, T., y Islam, M. (2009). Properties of higher strength concrete with crushed brick as coarse aggregate. *J Civ Eng*, 37. https://www.researchgate.net/publication/265882370_Properties_of_higher_strength_concrete_with_crushed_brick_as_coarse_aggregate
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (Quinta). Pontificia Universidad Javeriana. <https://books.google.com.co/books?id=EWq-QPJhsRACyprintsec=copyright#v=onepageyqf=false>
- Sandino, A. (1981). *Materiales para estructuras*. Escuela Colombiana de Ingeniería. https://books.google.com.co/books/about/Materiales_para_estructuras.html?id=OPEHMQAACA&redir_esc=y
- Schwerin, D. E., Cavalline, T. L., y Weggel, D. C. (2013). Use of Recycled Brick Masonry Aggregate and Recycled Brick Masonry Aggregate Concrete in Sustainable Construction. *KICEM Journal of Construction Engineering and Project Management*. <https://doi.org/10.6106/JCEPM.2013.3.1.028>
- Sharba, A. A. K., Abu Altemen, A. A. G., y Hason, M. M. (2021). Shear behavior of exploiting recycled brick waste and steel slag as an alternative aggregate for concrete production. *Materials Today: Proceedings*, 42, 2621–2628. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.591>
- Silva, R. V, de Brito, J., y Dhir, R. K. (2014). Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, 65, 201–217. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- Sunanda, P., Gopinandan, D., y Joyanta, P. (2016). A modified design method of concrete made with crushed brick aggregate. *Systems and Structures in Civil Engineering*. https://www.rilem.net/publication/publication/524?id_papier=12498
- Tošić, N., Marinković, S., Dašić, T., y Stanić, M. (2015). Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. *Journal of Cleaner Production*, 87(1), 766–776. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2014.10.070>

- Valencia, G. A. C., y Salazar, C. E. O. (2012). “*Adaptación del método de diseño de mezclas de concreto según ACI 211.1 Utilizando los tipos de cemento ASTM C-1157 Tipo GU Y ASTM C-1157 TIPO HE*”. [Trabajo de grado, Universidad de El Salvador]. Repositorio. <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14887/>
- Viviana, Á., y Rojas, P. (2012). Uso de triturado de ladrillo reciclado como agregado grueso en la elaboración de concreto. *Ingenium Revista de la facultad de ingeniería*, 13(26), 116–125. <https://doi.org/10.21500/01247492.1287>
- Yan, H., Shen, Q., Fan, L. C. H., Wang, Y., y Zhang, L. (2010). Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. *Building and Environment*, 45(4), 949–955. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2009.09.014>