

TESIS DE INVESTIGACIÓN
ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO CON
INCORPORACION DE VIDRIO MOLIDO Y ANÁLISIS COMPARATIVO A
PARTIR DE CONCRETO CON FIBRA DE ACERO Y CONCRETO
CONVENCIONAL



Por:
Carlos Andrés Amaya Meléndez
Marilyn Natalia Araque Fetecua



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2020

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN
ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO CON
INCORPORACION DE VIDRIO MOLIDO Y ANÁLISIS COMPARATIVO A
PARTIR DE CONCRETO CON FIBRA DE ACERO Y CONCRETO
CONVENCIONAL**



Por:
Carlos Andrés Amaya Meléndez
Marilyn Natalia Araque Fetecua

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional
de ingeniero civil

Aprobado por:
Ing. Emiro Andrés Lozano Pérez, Esp.
Director

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2020

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Fray José Gabriel Mesa Ángulo, O.P.
Rector General

Fray Eduardo González Gil, O.P.
Vicerrector Académico General

Fray José Antonio Balaguera Cepeda, O.P.
Rector Sede Villavicencio

Fray Rodrigo García Jara, O.P.
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Julieth Andrea Sierra Tobón
Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. Manuel Eduardo Herrera Pabón
Decano Facultad de Ingeniería Civil

Nota de aceptación

ING. MANUEL EDUARDO HERRERA PABÓN
Decano Facultad Ingeniería Civil

Emiro Andrés Lozano Pérez
Director Trabajo de Grado

Óscar Felipe Sáenz Pardo
Jurado

Villavicencio, 27 de octubre de 2020

DEDICATORIA

Dedico este proyecto de investigación, y por consiguiente este logro, a mi familia por su apoyo durante cada etapa relacionada con mis estudios universitarios, así como a cada docente que dedicó su tiempo para brindarme todos los conocimientos relacionados con el ámbito de la ingeniería civil, los cuales me permitieron cumplir este gran objetivo personal.

Carlos Andrés Amaya Meléndez

A mis padres por haberme formado como una persona con valores y haber podido contar con el apoyo en cada situación difícil durante mi proceso de formación, muchos de mis logros se los debo a ellos en especial este, ya que día a día lucharon de una u otra manera para que lograra ser una profesional, son mi motivo y mi mayor orgullo.

Marilyn Natalia Araque Fetecua

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a Dios y a mi familia el permitirme cumplir con este gran propósito personal, siendo un apoyo tanto emocional como económico en cada parte de mi proceso universitario, demostrando incondicionalidad en todo momento.

Carlos Andrés Amaya Meléndez

Por la culminación de la tesis agradezco especialmente a Dios y a mi familia por el apoyo brindado durante mi proceso de formación, haciendo de mí una persona íntegra con ganas de superarme cada día más.

Marilyn Natalia Araque Fetecua

Agradecemos también, y de forma conjunta, a la Universidad Santo Tomás por permitirnos desarrollar nuestros estudios en sus instalaciones, así como al ingeniero Emiro Lozano por brindarnos su tiempo y conocimientos durante todo el proceso de desarrollo de este proyecto investigativo.

RESUMEN

Por medio de este trabajo investigativo se establece el comportamiento del concreto con incorporación de diferentes porcentajes de vidrio molido (3%, 5%, 8%) como reemplazo de los agregados finos, diseñando veintisiete (27) cilindros distribuidos de forma equitativa para cada porcentaje, a los que se les agregó cada dosis respectiva de este material. Así mismo, se diseñaron nueve (9) cilindros de concreto convencional y nueve (9) cilindros con fibra de acero, en base a los cuales se realizó el análisis comparativo planteado, con el fin de establecer la viabilidad estructural y económica de los mismos.

Fue necesario realizar ensayos de trituración con el empleo de la máquina de los ángeles, ensayos de análisis granulométrico y finalmente ensayos de compresión para los cilindros, teniendo en cuenta las diferentes edades de falla establecidas para cada uno, y cuyos resultados permitieron determinar la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad de cada muestra, para posteriormente determinar la viabilidad estructural y económica del material estudiado.

Los resultados obtenidos arrojaron la viabilidad económica y estructural que representa el empleo de vidrio molido como reemplazante de un porcentaje determinado (3%) de agregado fino en las mezclas de concreto al presentar valores más que apropiados en su resistencia durante todo el desarrollo del proyecto investigativo, además de reducir el costo de producción teniendo en cuenta que el vidrio es un material reciclable cuyas propiedades se asemejan a las del agregado fino cuando se tritura y tamiza con tal propósito. Los resultados con mayor análisis fueron aquellos presentados a los cincuenta y seis (56) días al considerarlo el tiempo apropiado para la correcta homogeneización de la mezcla en base a la información que se tenía inicialmente sobre las propiedades físico-mecánicas del vidrio, siendo esta la edad a la cual se calculó el módulo de elasticidad y la relación de Poisson, obteniendo resultados aceptables y en base a los cuales se definió lo mencionado anteriormente.

Palabras Clave: Concreto, vidrio, propiedades físico-mecánicas, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad.

ABSTRACT

Through this research work, the behavior of concrete is established with the incorporation of different percentages of ground glass (3%, 5%, 8%) as a replacement for fine aggregates, designing twenty-seven (27) cylinders distributed equally for each percentage to which each respective dose of this material was added. Likewise, nine (9) conventional concrete cylinders and nine (9) steel fiber cylinders were designed, based on which the proposed comparative analysis was carried out, in order to establish their structural and economic viability.

It was necessary to carry out crushing tests with the use of the angel's machine, granulometric analysis tests and finally compression tests for the cylinders, considering the different failure ages established for each one, and whose results allowed determining the resistance to compression and modulus of elasticity of each sample, to later determine the structural and economic viability of the studied material.

The results obtained showed the economic and structural viability represented by the use of ground glass as a replacement for a certain percentage (3%) of fine aggregate in the concrete mixtures by presenting more than appropriate values in its resistance throughout the development of the research project. , in addition to reducing the cost of production, taking into account that glass is a recyclable material whose properties are similar to those of fine aggregate when crushed and sieved for this purpose. The results with the greatest analysis were those presented after fifty-six (56) days when considering it the appropriate time for the correct homogenization of the mixture based on the information that was initially had on the physical-mechanical properties of the glass, this being the age at which the modulus of elasticity and Poisson's ratio were calculated, obtaining acceptable results and based on which the aforementioned was defined.

Key Word: *Concrete, glass, physical-mechanical properties, resistance to compression, modulus of elasticity.*

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	13
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
2.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	14
2.2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
3.	JUSTIFICACIÓN.....	15
4.	OBJETIVOS.....	16
4.1.	OBJETIVO GENERAL	16
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
5.	ALCANCE.....	17
6.	MARCO DE REFERENCIA	18
6.1.	MARCO TEÓRICO	18
6.1.1	Propiedades Del cemento	18
6.1.2	Análisis granulométrico de los agregados.....	18
6.1.3	Ensayos al concreto endurecido. Resistencia.....	18
6.1.4	Ensayo a compresión del concreto	19
6.1.5	Módulo de elasticidad del concreto	19
6.2.	MARCO CONCEPTUAL	20
6.2.1	Propiedades de los agregados.....	20
6.2.2	Vidrio molido como agregado para concreto.....	20
6.2.3	Diseños de mezcla con adiciones	20
6.2.4	Ensayo de la máquina de los ángeles.....	20
6.2.5	Resistencia a la compresión	20
6.2.6	Ensayo a compresión del concreto (Máquina universal)	21
6.3.	ESTADO DEL ARTE.....	21
6.3.1	Catalán, “Estudio de la influencia del vidrio molido en hormigones grado H15, H20, Y H30”, 2013	21
6.3.2	Walhoff, “Influencia del vidrio molido en la resistencia a la compresión del concreto y costos de fabricación, comparado con el concreto convencional, Barranca-2016”, 2017	21
6.3.3	Muñoz, “Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibra de vidrio”, 2007.....	22
6.3.4	Arango y Zapata, “Influencia de la fibra de vidrio en las propiedades mecánicas de mezclas de concreto”, 2013	22
6.3.5	Cano y Cruz, “Análisis de mezclas de concreto con proporciones de vidrio molido, tamizado y granular como aditivo, a fin de aumentar la resistencia a la compresión del hormigón”, 2017	22
6.3.6	Castiblanco y Carrero, “Estudio teórico y experimental del comportamiento del hormigón con materiales no convencionales: fibras de vidrio y fibra de carbono, sometido a esfuerzos de compresión”, 2015.....	22
6.3.7	García, “Efecto de la fibra de vidrio en las propiedades mecánicas del concreto $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ en la ciudad de puno”, 2017.....	23
6.3.8	Leguizamón y Beltrán, “Estudio de las propiedades mecánicas que presenta el concreto geopolímero a base de ceniza de cascarilla de arroz producida en el departamento del Meta, y reforzado con fibras de acero”, 2019	23

6.4.	MARCO NORMATIVO	24
7.	METODOLOGÍA	25
7.1.	DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS	26
7.1.1	Definición del tema investigativo	26
7.1.2	Recopilación de información	26
7.1.3	Recolección, limpieza y triturado de material a emplear	26
7.1.4	Análisis granulométrico	26
7.1.5	Diseños de mezcla	26
7.1.6	Ensayos de laboratorio.....	27
7.1.7	Análisis de resultados	27
7.1.8	Conclusiones e informe final	27
8.	DISEÑO DE MEZCLA.....	28
8.1.	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES	28
8.1.1	Agregado fino y grueso	28
8.1.2	Fibra de acero	30
8.1.3	Vidrio molido	30
8.2.	CANTIDADES PARA EL DISEÑO DE MEZCLA	32
9.	ELABORACIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO	34
9.1.	TRITURADO DE VIDRIO.....	34
9.2.	FABRICACIÓN DE CILINDROS.....	34
10.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
10.1.	ENSAYO A COMPRESIÓN DE CILINDROS.....	37
10.2.	MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON.....	43
10.3.	ANÁLISIS DE COSTOS.....	45
11.	RESULTADOS E IMPACTOS	46
11.1.	RESULTADOS	46
11.2.	IMPACTOS	46
12.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	47
12.1.	CONCLUSIONES	47
12.2.	TRABAJOS FUTUROS.....	48
	BIBLIOGRAFÍA	49
	ANEXOS	51

LISTA DE TABLAS

Tabla 6.1 Tipos de cemento Portland más usados en Colombia	18
Tabla 6.2 Marco Normativo	24
Tabla 7.1 Diseño de mezcla para cilindros.....	26
Tabla 7.2 Especificaciones de los cilindros	27
Tabla 8.1 Granulometría del agregado fino	28
Tabla 8.2 Granulometría del agregado grueso.....	29
Tabla 8.3 Caracterización del agregado fino	29
Tabla 8.4 Caracterización del agregado grueso.....	30
Tabla 8.5 Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de acero.....	30
Tabla 8.6 Granulometría del vidrio molido.....	30
Tabla 8.7 Comparación granulométrica entre el agregado fino y el vidrio molido ..	31
Tabla 8.8 Diseño de mezcla cilindros convencionales	32
Tabla 8.9 Diseño de mezcla cilindros con fibra de acero	32
Tabla 8.10 Diseño de mezcla cilindros con 3% de vidrio molido	33
Tabla 8.11 Diseño de mezcla cilindros con 5% de vidrio molido	33
Tabla 8.12 Diseño de mezcla cilindros con 8% de vidrio molido	33
Tabla 8.13 Cantidad total de materiales.....	33
Tabla 10.1 Promedio de resultados de ensayo a compresión.....	37
Tabla 10.2 Resultado de los ensayos de compresión a la edad de 14 días.....	38
Tabla 10.3 Resultado de los ensayos de compresión a la edad de 28 días.....	39
Tabla 10.4 Resultado de los ensayos a compresión a la edad de 56 días.....	39
Tabla 10.5 Fallas obtenidas con ensayo de compresión.....	42
Tabla 10.6 Relación de Poisson para cada tipo de mezcla.....	44
Tabla 10.7 Costos para 1m ³ de concreto según los tipos de mezcla analizados ..	45
Tabla 11.1 Resultados esperados.....	46
Tabla 11.2 Impactos.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 6.1 Gráfica Esfuerzo – Deformación	19
Figura 7.1 Metodología	25
Figura 8.1 Curva granulométrica de agregado fino	28
Figura 8.2 Curva granulométrica de agregado grueso	29
Figura 8.3 Curva granulométrica de vidrio molido	31
Figura 8.4 Curva granulométrica del agregado fino y del vidrio molido	32
Figura 9.1 Limpieza y triturado de vidrio	34
Figura 9.2 Preparación de agregado fino y agregado grueso para la mezcla	34
Figura 9.3 Preparación de la mezcla	35
Figura 9.4 Camisas antes y después del llenado	35
Figura 9.5 Preparación del vidrio molido para la mezcla	36
Figura 9.6 Proceso de curado y fraguado de los cilindros	36
Figura 10.1 Comparación de resistencias promedio a compresión	37
Figura 10.2 Análisis de resistencia a compresión a los 14 días	38
Figura 10.3 Análisis de resistencia a compresión a los 28 días.	39
Figura 10.4 Análisis de resistencia a los 56 días	40
Figura 10.5 Resistencia a la compresión de mezclas	41
Figura 10.6 Fallas producidas por ensayo a compresión	41
Figura 10.7 Resistencia vs Deformación	43
Figura 10.8 Módulo de elasticidad para los diferentes tipos de mezcla	44

1. INTRODUCCIÓN

El concreto es un material comúnmente empleado para la construcción de infraestructura en Colombia, gracias a las características, tanto de durabilidad como de resistencia que presenta según los diferentes tipos de esfuerzo que sobre él son ejercidos, logrando así adquirir gran importancia en el ámbito de la construcción y la ingeniería.

En la actualidad, se ha buscado mejorar la resistencia del concreto durante su aplicación, implementando para ello la adición, en diversos porcentajes, de algunos materiales que le otorguen más eficiencia y magnitud a dicha característica, al igual que permitan generar un mayor beneficio económico respecto al costo del concreto convencional, por lo tanto, para este caso se busca implementar el vidrio molido como material reemplazante del agregado fino teniendo en cuenta sus características físico mecánicas, entre las cuales se encuentran la resistencia, el ligero peso y la versatilidad que presenta al momento de su manipulación, así como la viabilidad económica respecto a otros materiales basados en fibra sintética o natural (ESCOM, 2016).

Sumado a las características propias del vidrio, este material se encuentra estrechamente ligado a la construcción debido a los diferentes usos que se le han dado dentro de dicho campo, siendo este el motivo por el que se buscan desarrollar diferentes investigaciones en laboratorio, determinando su comportamiento y estableciendo una comparación entre este, el concreto con fibra de acero y el concreto tradicional, para posteriormente determinar el material más factible y benéfico para la construcción de diferentes estructuras de tipo convencional.

Es por esto que el desarrollo del proyecto investigativo tiene como fin determinar la eficiencia estructural y económica del concreto con diferentes porcentajes de vidrio molido, buscando la seguridad y confiabilidad al momento de su empleo, siendo esta una problemática actual en el ámbito constructivo, por lo que se realiza la investigación pertinente y se analizan los resultados en base al comportamiento del concreto convencional y concreto con fibra de acero, aportando una justificación razonable al momento de decidir qué compuesto es más viable.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El concreto tradicional puede llegar a presentar fenómenos patológicos que afectan estéticamente la estructura, como lo son los cambios de color y las eflorescencias producto de la calidad del agua empleada para el amasado y de sus diferentes agregados. Así mismo, existen fenómenos estructurales del concreto, como la fisuración, la cual depende de problemas propios del hormigón y puede estar ligado a su forma de fabricación o al manejo que se le dé durante su empleo (Pérez), teniendo en cuenta factores que dependen del contenido de agua agregado o la temperatura de la zona donde se emplee.

Es por esto que se plantea la adición de vidrio, con el propósito de evaluar el comportamiento del material respecto a problemas de expansión presentados de forma común en el concreto convencional, teniendo en cuenta que el vidrio es un material compuesto por filamentos poliméricos basados en dióxido de silicio, que puede estar sujeto a cargas dinámicas como impactos y explosión (Carpinteri, Cantera, Fortese, & Ronchei, 2019), surgiendo la necesidad de conocer las propiedades físico-mecánicas que pueden existir en el concreto mezclado con ciertos porcentajes de vidrio molido al momento de estar sometido a pruebas de compresión, para luego determinar su módulo de elasticidad y resistencia, y en base a estos resultados, comparar con el comportamiento de concreto mezclado con fibra de acero según resultados ya obtenidos.

2.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Qué cambios se presentan en el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión del concreto modificado con vidrio molido respecto al concreto con fibra de acero y al concreto convencional?

3. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, la reutilización del vidrio es considerada como una de las ventajas para la construcción, debido al ahorro de energía que brinda utilizar más veces un mismo envase, por lo que se buscan diferentes usos a todos aquellos elementos compuestos principalmente de vidrio, en base también al gran porcentaje de reciclabilidad que posee dicho material y la fácil maniobrabilidad que adquiere al momento de ser triturado, tal y como se pretende hacer con el desarrollo del presente proyecto investigativo.

Entre los beneficios medioambientales producto del reciclaje de vidrio se encuentran principalmente la prevención del empleo de materias primas cuya extracción puede afectar el medio ambiente (como sucede con algunos tipos de arena), el ahorro de energía generada para producir nuevos elementos, así como la prevención de emisiones de dióxido de carbono, elemento bastante perjudicial para el entorno ambiental (Hablando en vidrio, 2019).

Es por este comportamiento y estos beneficios ambientales que se plantea adicionar el vidrio molido al concreto para determinar en qué se ve afectado este último, teniendo en cuenta que el concreto con diferentes agregados tiene aplicaciones en más de cien países alrededor del mundo, existiendo así una fuerte implementación e innovación del concreto en el mercado, siendo una de las alternativas más usadas para la fabricación de todo tipo de construcciones civiles, como lo son edificios industriales y urbanos o centros comerciales (Fibraplus, 2018).

De igual manera, la implementación del vidrio está basada en otras características mucho más específicas y propias de este material, como lo son: buena resistencia mecánica a compresión y flexión, incombustibilidad, buena flexibilidad, bajo costo, buena resistencia a agentes químicos, maleabilidad y dureza (Uriarte, 2019), las cuales al ser implementadas con las propiedades del concreto podrían generar un material con condiciones más favorables, con menos porcentaje de falla y teniendo en cuenta la relación costo beneficio, considerando la viabilidad económica y estructural respecto al concreto con adición de fibras de acero, el cual presenta gran resistencia a flexión y no difiere mucho respecto al concreto tradicional cuando se evalúa la resistencia a compresión (Caballero, 2017).

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar las propiedades físico-mecánica del concreto con incorporación de vidrio molido teniendo en cuenta diferentes porcentajes de adición, para comparar su comportamiento respecto al concreto con adición de fibra de acero y el concreto convencional.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir las cantidades de material requerido para llevar a cabo los ensayos de mezcla de concreto empleando diferentes proporciones de vidrio molido.
- Analizar el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión para los diferentes ensayos según las diferentes cantidades de vidrio molido agregadas.
- Comparar y evaluar el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión de los concretos modificados con vidrio molido, con fibra de acero y el concreto convencional.
- Establecer la relación costo beneficio del concreto con inclusión de vidrio molido respecto al concreto con fibra de acero y el concreto convencional.

5. ALCANCE

Con la realización de los ensayos de laboratorio pertinentes y el desarrollo del proyecto en general, se pretende determinar las características físico-mecánicas que adquiere el concreto tradicional, con una resistencia de diseño de 21 MPa, al momento de agregarle vidrio molido como reemplazante del agregado fino, el cual es un material que, individualmente, presenta un comportamiento aceptable en lo que a resistencia y versatilidad se refiere (Catalán, 2013), además de ser comparado este comportamiento con el presentado por el concreto con adición de fibra de acero.

Es necesario tener en cuenta que la influencia del vidrio en el concreto puede presentar diversos comportamientos según los esfuerzos a los que este material sea sometido, por lo tanto se centra inicialmente en el desarrollo y el estudio del comportamiento de materiales con características y propiedades diferentes a los ya conocidos y comúnmente empleados en el campo de la construcción, por lo que es este sector el que presenta mayor expectación de acuerdo a los resultados que se establezcan mediante los estudios a realizar.

Según la aplicabilidad que busca emplear el concreto con vidrio molido como material necesario para su composición, todas aquellas empresas y constructoras que se encuentren relacionadas al ámbito de la ingeniería civil son quienes buscan prestar más atención al desarrollo del proyecto y por ende al análisis final de los resultados referidos al comportamiento del material cuando sobre él son ejercidos esfuerzos a compresión, así como los análisis que determinan la relación costo beneficio del mismo en comparación al concreto que presenta adición de fibra de acero y al concreto convencional.

Para el desarrollo del proyecto se tienen en cuenta veintisiete (27) cilindros elaborados con vidrio molido, nueve (9) con fibra de acero y nueve (9) cilindros más diseñados de forma convencional, a los cuales se les realizarán las pruebas y ensayos necesarios, entre los que se encuentran ensayos de triturado, granulométricos, así como de compresión, para posteriormente definir una interpretación correcta de sus resultados, brindando un enfoque más específico del empleo que puede tener este material de acuerdo a su comportamiento a compresión, lo que permitirá establecer la viabilidad económica y estructural de dicho material en el mercado.

Los ensayos a compresión de los cuarenta y cinco (45) cilindros se realizan a los 14, 28 y 56 días y en base a ello se determinan los resultados y conclusiones correspondientes.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO TEÓRICO

6.1.1 Propiedades Del cemento

Según lo establecido en la normatividad colombiana, el cemento Portland es el más empleado en el país, por lo que es el material referente para realizar el respectivo análisis comparativo en la investigación, clasificándose según su tipo de la siguiente manera:

Tabla 6.1 Tipos de cemento Portland más usados en Colombia

Tipo	Descripción	Norma
I	Uso común	NTC 30
II	Resistencia moderada a sulfatos y moderado calor de hidratación	NTC 30
III	Alta resistencia inicial	NTC 30
IV	Bajo calor de hidratación	NTC 30
V	Cemento Portland de escoria de alto horno	NTC 30
	Cemento Portland puzolánico	NTC 31
	Cemento Portland adicionado	NTC 31
	Cemento para mampostería	NTC 4050

Fuente: Tecnología del concreto. Asocreto.

6.1.2 Análisis granulométrico de los agregados

Los ensayos de granulometría son necesarios para establecer qué parte del material estudiado es la más adecuada al momento de reemplazar los agregados finos de una mezcla. Para la realización del análisis respectivo, deben emplearse los tamices correspondientes, los cuales permitirán el paso del material cuyos diámetros sean los más diminutos y se asemejen al tamaño propio del agregado fino comúnmente empleado en la mezcla (Sánchez de Guzmán, 2011).

6.1.3 Ensayos al concreto endurecido. Resistencia.

Las pruebas de resistencia realizadas al concreto dependen principalmente del uso que se pretenda dar a la estructura además de la aplicación de los resultados obtenidos de cada ensayo realizado.

Según esto, es posible diferenciar dos especímenes de prueba distintos, siendo más comunes aquellos pre moldeados de concreto fresco, los cuales se caracterizan por ser probetas (cilindros) elaboradas y ensayadas según las diferentes indicaciones de normas tales como la NTC 673 (ensayo a la compresión de cilindros normales de concreto), NTC 2871 (ensayo de flexión del hormigón usando la viga simple con carga en los tercios) y NTC 722 (ensayo de tracción indirecta de cilindros de concreto) (Sánchez de Guzmán, 2011).

6.1.4 Ensayo a compresión del concreto

Este método de ensayo consiste en la determinación de la resistencia a compresión de cilindros de concreto, esta resistencia se mide fallando probetas cilíndricas en una maquina universal de ensayos de compresión. Dicha resistencia se calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección transversal que resiste a la carga y se representa en Megapascuales (MPa), los resultados obtenidos en el ensayo son base fundamental para el control de calidad de las operaciones de dosificación, mezclado y colocación del concreto, determinación del cumplimiento de las especificaciones y la evaluación de la efectividad de aditivos, en este caso el vidrio molido [9]. Los requerimientos para la resistencia a la compresión pueden variar desde 17 MPa para concreto residencial, hasta 28 MPa y más para estructuras comerciales.

6.1.5 Módulo de elasticidad del concreto

También llamado “módulo de Young”, es considerado como la relación existente entre el esfuerzo al que se somete el concreto y su deformación. Así mismo, la relación entre este y la resistencia del material depende en gran medida de las condiciones de los materiales empleados en la mezcla, así como de la edad de la misma teniendo en cuenta que, a edades mayores, tanto la resistencia como el módulo de elasticidad aumentan significativamente (Rivera).

El módulo de elasticidad se determina por medio de la NTC 4025 y se representa mediante una gráfica de esfuerzo-deformación como la siguiente:

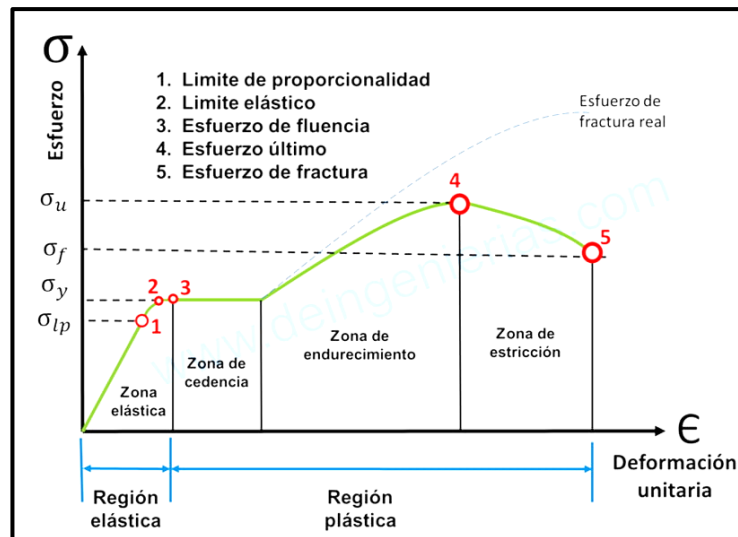


Figura 6.1 Gráfica Esfuerzo – Deformación

Fuente: www.deingenierias.com

6.2. MARCO CONCEPTUAL

6.2.1 Propiedades de los agregados

En una mezcla, es recomendado el uso de un agregado que tenga características de alta densidad y baja absorción, destacando la ausencia de partículas que se consideren dañinas, existiendo la posibilidad de emplear agregados marinos con la única opción de que su adición sea inferior al 0.10% del peso total del cemento (Sánchez de Guzmán, 2011).

6.2.2 Vidrio molido como agregado para concreto

El vidrio es un material caracterizado por sus propiedades de alta resistencia al comportarse como un sólido, lo que permite que su empleo como agregado sea de gran utilidad teniendo en cuenta además que sus componentes son a base de arena y arcilla. Así mismo, el empleo del vidrio como agregado fino en una mezcla de concreto, permite el ahorro de energía al no haber necesidad de extraer gran cantidad de materias primas además de que reduce en un gran porcentaje la contaminación medioambiental.

6.2.3 Diseños de mezcla con adiciones

Las adiciones constituyen un porcentaje de material cementante en el concreto, estos materiales son subproductos de otros procesos o materiales de origen natural, algunos de ellos son denominados puzolanas, que por sí mismo no tienen como tal una propiedad cementante, pero cuando se usan con cemento portland reaccionan para formar componentes que logren el proceso de cementación (Sánchez de Guzmán, 2011).

6.2.4 Ensayo de la máquina de los ángeles

Es un procedimiento realizado para evaluar la resistencia al desgaste de los agregados gruesos por medio de la máquina de los ángeles, como consecuencia de la acción combinada de la abrasión, machaqueo e impacto. La muestra para el ensayo se obtiene mediante el tamizado separando las distintas fracciones del agregado según el método acorde a la granulometría del material a ensayar.

6.2.5 Resistencia a la compresión

Es la característica mecánica principal y más influyente del concreto, se puede determinar como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, esta resistencia es medida a partir de pruebas de laboratorio para determinar que la mezcla suministrada cumpla con los requerimientos de resistencia especificados para el tipo de estructura que se quiere desarrollar (Sánchez de Guzmán, 2011).

6.2.6 Ensayo a compresión del concreto (Máquina universal)

La resistencia a la compresión es la característica principal del concreto, dada la importancia que abarca dentro de una estructura convencional. El objetivo principal de este ensayo es determinar la máxima resistencia a la compresión de un cilindro de muestra frente a una carga aplicada axialmente, y los esfuerzos y deformaciones que se generan a base de la acción de esta fuerza.

6.3. ESTADO DEL ARTE

Teniendo en cuenta que la temática planteada durante el desarrollo de este proyecto se encuentra relacionada al comportamiento del concreto cuando se le adicionan cantidades de fibra de vidrio, y la posterior comparación de su relación costo beneficio respecto al concreto con fibras de acero, se encuentran ciertas referencias que brindan mayor conocimiento y sirven de guía al momento de establecer determinadas pautas necesarias para el correcto desarrollo de los estudios y análisis planteados.

6.3.1 Catalán, “Estudio de la influencia del vidrio molido en hormigones grado H15, H20, Y H30”, 2013

Inicialmente se concluyó que la cantidad de agua requerida para la mezcla disminuye al ser el vidrio un material que evita la absorción del líquido. Además, se logró determinar que la resistencia del hormigón aumenta cuando se incluye aproximadamente 10% de vidrio a la mezcla, analizando que entre mayor sea la cantidad de material adicionado, menor será la resistencia del concreto teniendo en cuenta la fragilidad del vidrio, aunque esto no niega que la factibilidad de dicho material es completamente alta al no alterar en gran medida las características principales del concreto (Catalán, 2013).

6.3.2 Walhoff, “Influencia del vidrio molido en la resistencia a la compresión del concreto y costos de fabricación, comparado con el concreto convencional, Barranca-2016”, 2017

Con el desarrollo de esta investigación se optó por tener en cuenta diferentes porcentajes (5%, 10%, 15%) de vidrio molido como reemplazo del cemento, logrando concluir que el concreto adquiere mayor resistencia cuando se le agrega 5% de vidrio, superando así en este sentido a las demás muestras estudiadas además del concreto convencional de acuerdo con la distribución “t student”, relacionada por el autor como guía para el análisis y las conclusiones del proyecto. Sumado a estos resultados, se determinó que el costo de fabricación del concreto con adición de vidrio molido aumenta con relación al concreto tradicional a pesar del empleo del vidrio reciclado (Walhoff, 2017).

6.3.3 Muñoz, “Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibra de vidrio”, 2007

Este proyecto investigativo buscó establecer e identificar qué propiedades y qué comportamiento adquiere el concreto tradicional cuando se le agregaba fibra de vidrio, realizando para ello ensayos de resistencia tanto a compresión como a tensión, además de un análisis relacionado con la ductilidad de esta mezcla para su posterior uso. Para ello se agregaron diferentes porcentajes de fibra de vidrio correspondientes al 0.03%, 0.5%, 1% y 1.5% los cuales pretendían determinar una dosificación que permitiera que el material alcanzase resistencias de aproximadamente 28 MPa (Muñoz, 2007).

6.3.4 Arango y Zapata, “Influencia de la fibra de vidrio en las propiedades mecánicas de mezclas de concreto”, 2013

Desarrollaron una investigación para la cual también emplearon diferentes porcentajes de fibra de vidrio respecto al peso de la mezcla en general, entre los que se encuentran 0.5%, 1%, 1.5%, 2% y 2.5%, y que posteriormente fueron sometidos a ensayos de resistencia a la compresión, estableciendo que a mayor porcentaje de fibra de vidrio le sea agregado a la mezcla, menor será su resistencia a compresión (Arango & Zapata, 2013).

6.3.5 Cano y Cruz, “Análisis de mezclas de concreto con proporciones de vidrio molido, tamizado y granular como aditivo, a fin de aumentar la resistencia a la compresión del hormigón”, 2017

Buscaron determinar el comportamiento del concreto cuando es sometido a esfuerzos de compresión empleando para ello vidrio en diferentes presentaciones (molido, tamizado, granular) y asignando para cada una de ellas distintos porcentajes de adición, logrando establecer que tanto el vidrio granular como el vidrio molido adquieren mayor resistencia cuando se emplea 5% del mismo, mientras que el vidrio tamizado solamente requiere de 3% de su uso, afirmando su hipótesis inicial, donde planteaban que las probetas que contenían vidrio, independientemente de los porcentajes del mismo, alcanzan mayor resistencia respecto al concreto común (Cano & Cruz, 2017).

6.3.6 Castiblanco y Carrero, “Estudio teórico y experimental del comportamiento del hormigón con materiales no convencionales: fibras de vidrio y fibra de carbono, sometido a esfuerzos de compresión”, 2015

Esta investigación se basó fundamentalmente en el estudio del comportamiento de materiales sintéticos cuando son sometidos a esfuerzos únicamente de compresión para posteriormente realizar la respectiva comparación con el concreto simple, obteniendo un grado de mejoría del concreto con fibra de aproximadamente el 45% respecto al simple, empleando para ello aproximadamente 0.8% de fibra de vidrio al momento de realizar la mezcla inicial (Castiblanco & Carrero, 2015).

6.3.7 García, “Efecto de la fibra de vidrio en las propiedades mecánicas del concreto $f'c=210$ kg/cm² en la ciudad de puno”, 2017

Desarrolló un proyecto investigativo mediante el cual analizó el comportamiento a compresión del concreto con adición de fibra de vidrio en porcentajes de 0.025%, 0.075% y 0.125%, estableciendo que este tipo de concreto presenta mayor resistencia respecto al concreto simple, además de presentar una notoria disminución (aproximadamente 2.94%) en lo que a costo de producción se refiere al emplear 0.025% de fibra de vidrio (García, 2017).

6.3.8 Leguizamón y Beltrán, “Estudio de las propiedades mecánicas que presenta el concreto geopolímero a base de ceniza de cascarilla de arroz producida en el departamento del Meta, y reforzado con fibras de acero”, 2019

Estudiaron el comportamiento del concreto con incorporación de materiales diferentes a los comúnmente empleados, como lo son la ceniza de cascarilla de arroz y la fibra de acero en ciertas cantidades específicas (ceniza de cascarilla: 20% y fibra de acero: 0.5%, 1% y 1,5%). Como resultado de los ensayos pertinentes, lograron concluir que el uso de más de 1% de fibra de acero en la mezcla disminuye la resistencia del concreto y a su vez determinaron que, a mayor edad para cada cilindro, mayor será su resistencia a compresión (Leguizamón & Beltrán, 2019).

6.4. MARCO NORMATIVO

Tabla 6.2 Marco Normativo

Norma	Descripción
NSR-10 TITULO C	Norma colombiana de sismo resistencia
NTC 129	Norma practica para la toma de muestras de agregados
NTC 1776	Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados
NTC 5541	Concreto reforzado con fibras
NTC 673	Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto
NTC 4227	Máquinas de ensayo para la verificación de tensión y compresión de los cilindros de prueba
NTC 4025	Determinación del módulo de elasticidad estático de una muestra de concreto a compresión

Fuente: Autores

7. METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta que se plantea la inclusión de un material cuyo empleo puede determinar resultados positivos o negativos en las características y el comportamiento del concreto respecto al concreto con vidrio molido y concreto con adición de fibra de acero, y de acuerdo con el alcance y presupuesto establecido para el desarrollo del proyecto, se describen determinadas etapas según los requerimientos del desarrollo del proyecto (Ver Figura 7.1).

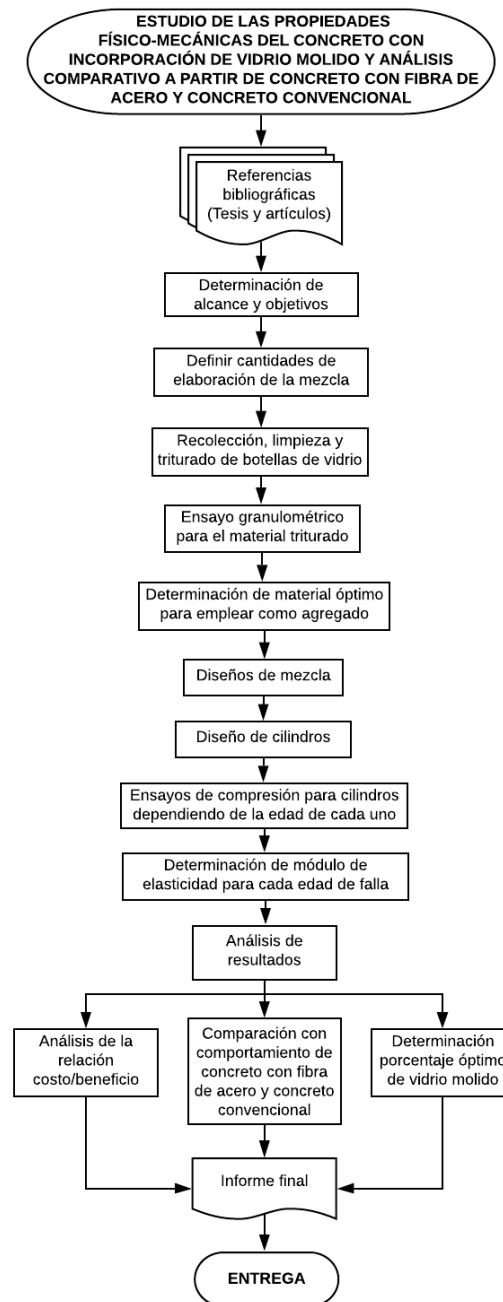


Figura 7.1 Metodología
Fuente: Autores

7.1. DESCRIPCIÓN DE ETAPAS Y TAREAS

7.1.1 Definición del tema investigativo

Inicialmente se estableció el tema a investigar y su posible alcance, teniendo en cuenta las problemáticas relacionadas a él y los posibles resultados que puedan establecerse, conociendo que pueden ser positivos o negativos de acuerdo con el análisis que se determine para los mismos. Así mismo se contemplan los ensayos de laboratorio pertinentes, entre los cuales se encuentran el ensayo con la máquina de los ángeles, ensayo de granulometría y ensayos de compresión de cilindros.

7.1.2 Recopilación de información

Se escogen y analizan investigaciones previas mencionadas en el estado del arte, cuyo enfoque haya estado relacionado al desarrollo y comportamiento del concreto con vidrio molido, estableciendo así los porcentajes a emplear y los ensayos requeridos para obtener los resultados que posteriormente serán analizados.

7.1.3 Recolección, limpieza y triturado de material a emplear

Es necesario recolectar todos aquellos elementos compuestos de vidrio que no pretendan ser usados a futuro, con el fin de realizar la respectiva limpieza y posterior triturado mediante el empleo de la máquina de los ángeles, para con ello ejecutar el análisis granulométrico.

7.1.4 Análisis granulométrico

Al tener el material triturado, se debe realizar el respectivo estudio granulométrico con el uso específico de los tamices necesarios, para determinar qué cantidad es la óptima de acuerdo al diámetro de sus partículas y establecer cuál puede ser agregada a la mezcla y con ello reemplazar el agregado fino que esta requiere.

7.1.5 Diseños de mezcla

Se establecen las cantidades de cada material según los diferentes porcentajes de vidrio (3%, 5%, 8%) que se añadirán al concreto y la cantidad total de cilindros que se deben diseñar para la correcta realización de las pruebas de laboratorio.

Tabla 7.1 Diseño de mezcla para cilindros

No.	Diseño de mezcla para Cilindros
1	Concreto convencional
2	Concreto con fibra de acero
3	Concreto con 3% de vidrio molido
4	Concreto con 5% de vidrio molido
5	Concreto con 8% de vidrio molido

Fuente: Autores

7.1.6 Ensayos de laboratorio

Se realizan los ensayos en la máquina universal para un total de cuarenta y cinco (45) cilindros diseñados, de los cuales nueve (9) son de concreto convencional, nueve (9) contienen fibra de acero y los veintisiete (27) restantes son realizados con incorporación de vidrio molido según los porcentajes anteriormente establecidos, con el fin de determinar el comportamiento de cada muestra cuando está sometida a esfuerzos de compresión. Se fallan 3 cilindros de cada porcentaje según la edad correspondiente (14, 28 y 56 días).

Tabla 7.2 Especificaciones de los cilindros

	14 días	28 días	56 días	Total
Cilindro convencional	3	3	3	9
Cilindro con Fibra de Acero	3	3	3	9
Cilindro con 3% de Vidrio Molido	3	3	3	9
Cilindro con 5% de Vidrio Molido	3	3	3	9
Cilindro con 8% de Vidrio Molido	3	3	3	9
Total General				45

Fuente: Autores

7.1.7 Análisis de resultados

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos al realizar las pruebas de laboratorio, estos deben ser analizados para posteriormente determinar el módulo de elasticidad del material y la relación costo-beneficio para cada espécimen con la adición de porcentaje de vidrio respectivo, establecer un porcentaje de vidrio molido óptimo para la mezcla y a su vez realizar la respectiva comparación con el comportamiento del concreto con adición de fibra de acero.

El módulo de elasticidad es calculado con base en los resultados obtenidos luego de someter los cilindros a esfuerzos de compresión, analizando para ello la capacidad máxima de resistencia de cada uno, así como la deformación que presentaron durante el desarrollo del ensayo.

7.1.8 Conclusiones e informe final

Finalmente se redacta el informe final de acuerdo con las conclusiones previamente establecidas, describiendo cada uno de los procesos investigativos que se llevaron a cabo y los resultados que surgieron luego de la realización de estos, con el fin de dar a conocer cada parte del desarrollo del proyecto.

8. DISEÑO DE MEZCLA

8.1. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

8.1.1 Agregado fino y grueso

Para el desarrollo del proyecto investigativo se empleó agregado fino y grueso adquirido en la ferretería “La Z”, ubicada en la ciudad de Villavicencio. Dicho material fue caracterizado teniendo en cuenta inicialmente 1000 gramos de agregado fino y 2000 gramos de agregado grueso, los cuales debieron tamizarse siguiendo el método para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos establecido en la norma NTC 77 y posteriormente fueron comparados con los límites establecidos en la NTC 174.

Tabla 8.1 Granulometría del agregado fino

Granulometría de Agregado Fino				
Tamiz (No.)	Peso (gr)	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
4	0.000	0.000	0.000	100.000
10	28.469	2.857	2.857	97.143
30	76.876	7.714	10.571	89.429
40	112.649	11.304	21.875	78.125
100	628.946	63.114	84.989	15.011
200	105.897	10.627	95.616	4.384
Fondo	43.689	4.384	100.000	0.000
Total Peso (gr)		996.526		

Fuente: Autores

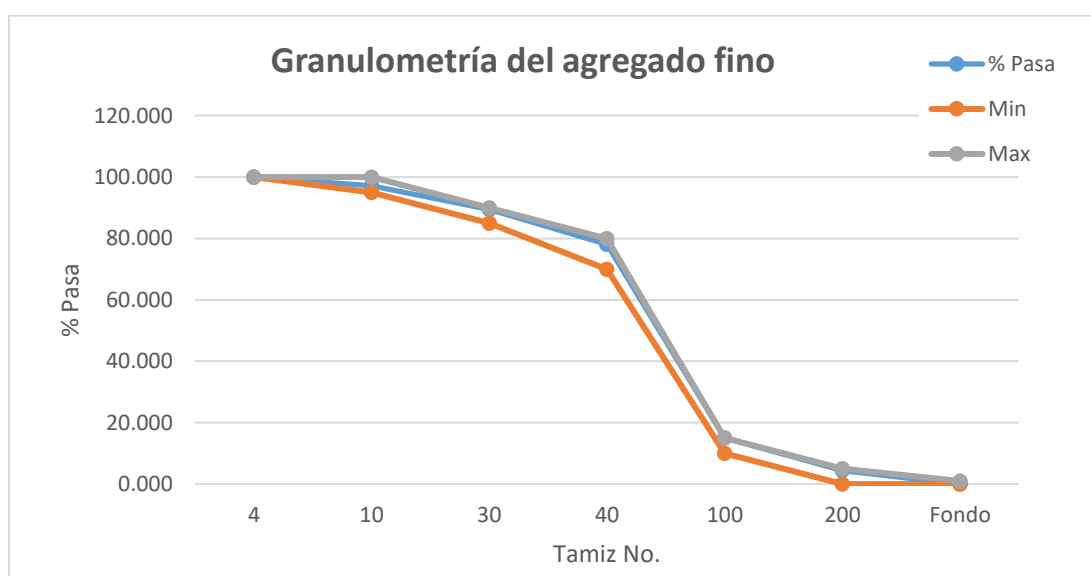


Figura 8.1 Curva granulométrica de agregado fino

Fuente: Autores

Tabla 8.2 Granulometría del agregado grueso

Granulometría de Agregado Grueso				
Tamiz (")	Peso (gr)	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
1 ½	0.000	0.000	0.000	100.000
1	56.800	2.841	2.841	97.159
¾	726.459	36.338	39.179	60.821
½	1025.624	51.302	90.481	9.519
Fondo	190.300	9.519	100.000	0.000
Total Peso (gr)		1999.183		

Fuente: Autores

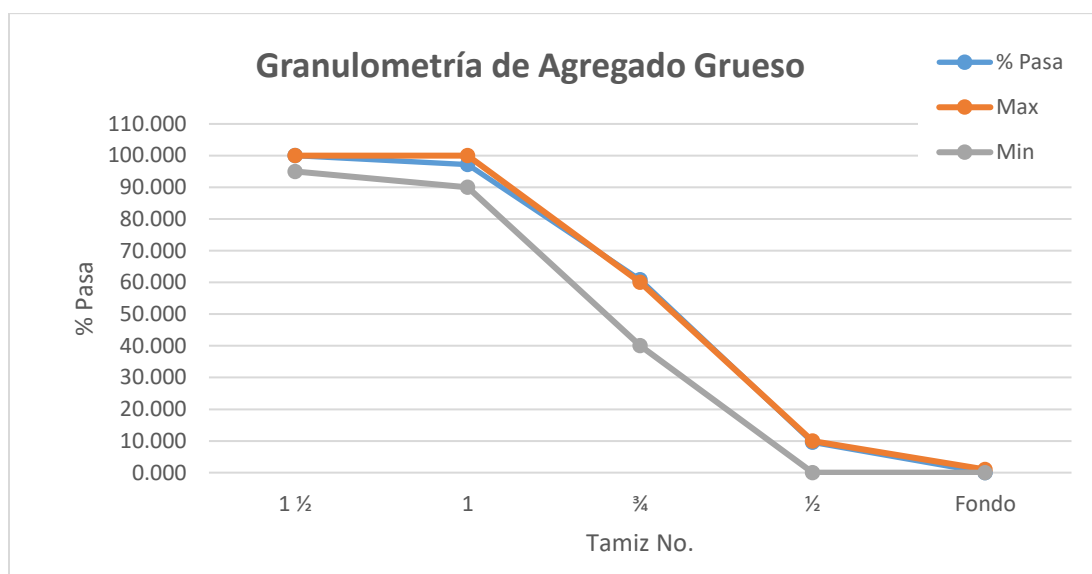


Figura 8.2 Curva granulométrica de agregado grueso

Fuente: Autores

Adicional al cálculo de la granulometría para el agregado fino, se estableció la caracterización propia del mismo, basada en propiedades como la capacidad de absorción y el contenido de humedad que este presentaba.

Tabla 8.3 Caracterización del agregado fino

Característica	Resultado
Peso Unitario Apisonado	1678.89 Kg/m ³
Peso Unitario Suelto	1596.26 Kg/m ³
Peso Específico Aparente	1.88 gr/cm ³
Peso Específico Nominal	2.12 gr/cm ³
Absorción	1.04 %
Humedad Natural	6.15 %

Fuente: Autores

Tabla 8.4 Caracterización del agregado grueso

Característica	Resultado
Peso Unitario Apisonado	1479.98 Kg/m ³
Peso Unitario Suelto	1434.38 Kg/m ³
Peso Específico Aparente	2.16 gr/cm ³
Peso Específico Nominal	2.36 gr/cm ³
Absorción	1.81 %
Humedad Natural	2.45 %

Fuente: Autores

8.1.2 Fibra de acero

Se implementaron fibras de acero comúnmente empleadas para el reforzamiento de concretos convencionales y cuya referencia es Sika Fiber CHO 65/35, las cuales se consideran apropiadas para el correcto desarrollo del proyecto investigativo.

Tabla 8.5 Propiedades físicas y mecánicas de la fibra de acero

Propiedades físicas y mecánicas fibra de acero

Longitud	35 mm
Diámetro	0.54 mm
Resistencia a tracción	1150 MPa
Módulo de elasticidad	200 GPa
Elongación de ruptura	4% máx.

Fuente: Autores

8.1.3 Vidrio molido

El vidrio empleado se obtuvo de botellas recolectadas en la ciudad de Villavicencio, estas se limpiaron y posteriormente se trituraron con el empleo de la máquina de los ángeles hasta que sus propiedades se asemejaran a las del agregado fino.

Tabla 8.6 Granulometría del vidrio molido

Granulometría de Vidrio molido				
Tamiz (No.)	Peso (gr)	% Retenido	% Acumulado	% Pasa
4	0.000	0.000	0.000	100.000
10	26.954	2.698	2.698	97.302
30	62.548	6.262	8.960	91.040
40	87.590	8.769	17.729	82.271
100	602.458	60.314	78.043	21.957
200	162.478	16.266	94.309	5.691
Fondo	56.849	5.691	100.000	0.000
Total Peso (gr)	998.877			

Fuente: Autores

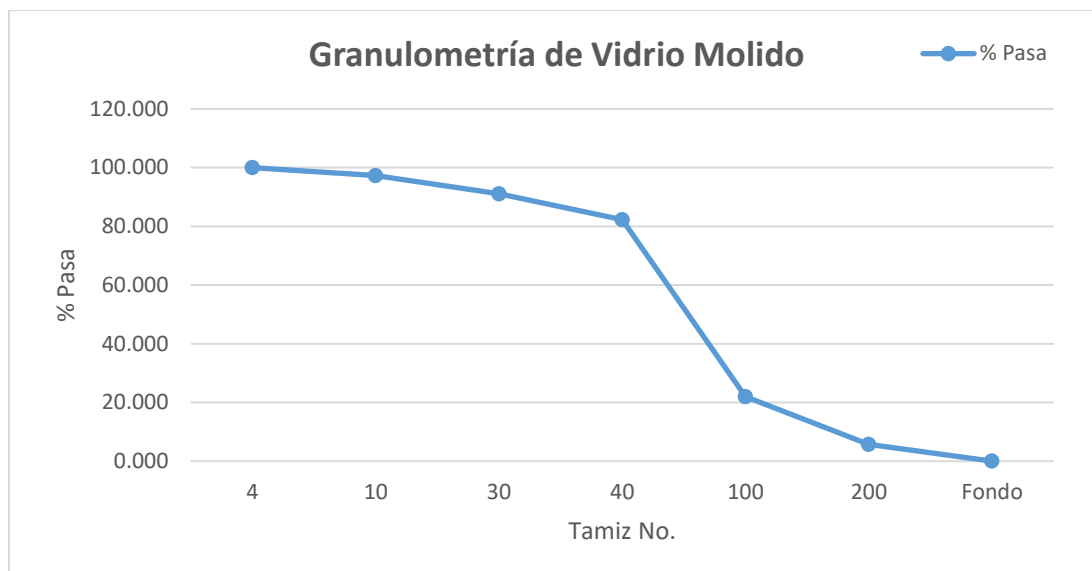


Figura 8.3 Curva granulométrica de vidrio molido
Fuente: Autores

De acuerdo a las características granulométricas presentadas tanto para el agregado fino como para el vidrio molido, y basado en que este último reemplazará al primero en la mezcla en diferentes porcentajes (3%, 5%, 8%), es necesario realizar la comparación entre los mismos para evaluar con anticipación si el desarrollo de la investigación resulta viable, demostrando que no existe gran diferencia granulométrica entre ambos materiales, tal y como se demuestra a continuación:

Tabla 8.7 Comparación granulométrica entre el agregado fino y el vidrio molido

Curva granulométrica del agregado fino y del vidrio molido		
	Agregado fino	Vidrio Molido
Tamiz (No.)	% Pasa	% Pasa
4	100.000	100.000
10	97.143	97.302
30	89.429	91.040
40	78.125	82.271
100	15.011	21.957
200	4.384	5.691
Fondo	0.000	0.000

Fuente: Autores

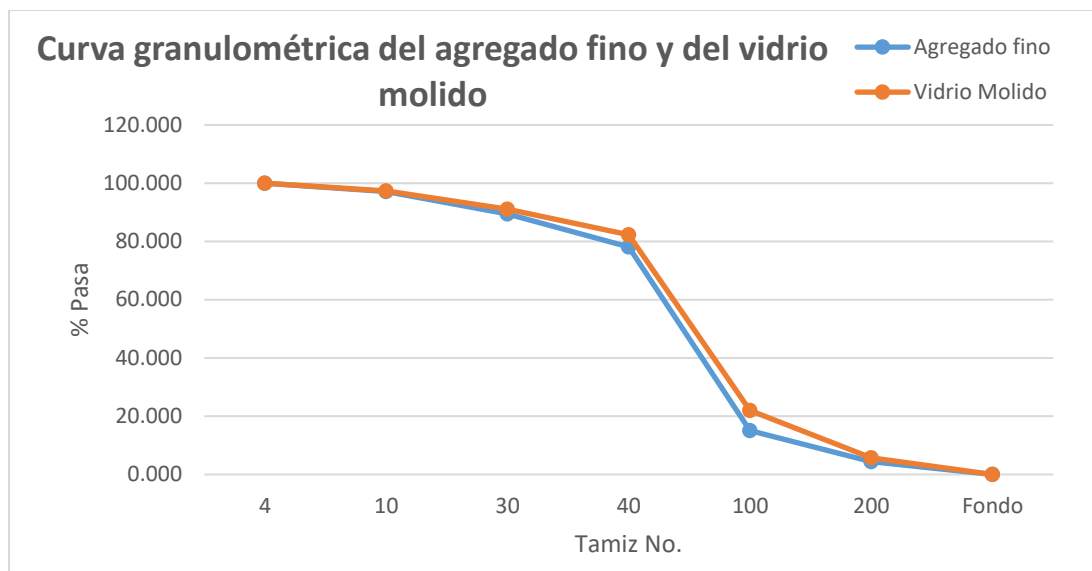


Figura 8.4 Curva granulométrica del agregado fino y del vidrio molido
Fuente: Autores

8.2. CANTIDADES PARA EL DISEÑO DE MEZCLA

Teniendo en cuenta las propiedades obtenidas anteriormente para cada material, se determinó la cantidad necesaria de cada uno que debía ser empleada para la correcta elaboración de los cilindros, sumándole a ello un desperdicio del 20%, el cual se estableció con el propósito de que no faltase alguna determinada cantidad de material durante dicho proceso y así mismo evitando mayores gastos que influyan económicamente en la investigación. Revisar **ANEXO A**.

Tabla 8.8 Diseño de mezcla cilindros convencionales

Cilindros Convencionales	
Agua	0.0084 m ³
Cemento	18.753 kg
Agregado fino	31.000 kg
Agregado grueso	60.790 kg

Fuente: Autores

Tabla 8.9 Diseño de mezcla cilindros con fibra de acero

Cilindros con Fibra de Acero	
Agua	0.0084 m ³
Cemento	18.753 kg
Agregado fino	31.000 kg
Fibra de acero	0.240 kg
Agregado grueso	60.790 kg

Fuente: Autores

Tabla 8.10 Diseño de mezcla cilindros con 3% de vidrio molido

Cilindros con 3% de Vidrio Molido	
Agua	0.0084 m ³
Cemento	18.753 kg
Agregado fino	30.071 kg
Vidrio molido	0.9300 kg
Agregado grueso	60.790 kg

Fuente: Autores

Tabla 8.11 Diseño de mezcla cilindros con 5% de vidrio molido

Cilindros con 5% de Vidrio Molido	
Agua	0.0084 m ³
Cemento	18.753 kg
Agregado fino	29.451 kg
Vidrio molido	1.5500 kg
Agregado grueso	60.790 kg

Fuente: Autores

Tabla 8.12 Diseño de mezcla cilindros con 8% de vidrio molido

Cilindros con 8% de Vidrio Molido	
Agua	0.0084 m ³
Cemento	18.753 kg
Agregado fino	28.521 kg
Vidrio molido	2.4800 kg
Agregado grueso	60.790 kg

Fuente: Autores

En base a las cantidades especificadas para la elaboración de cada tipo de cilindro, se determina la cantidad total de materiales que deben ser empleados para el desarrollo general del proyecto investigativo.

Tabla 8.13 Cantidad total de materiales

Cantidad total de materiales	
Agua	0.0425 m ³
Cemento	93.800 kg
Agregado fino	149.893 kg
Agregado grueso	303.950 kg
Vidrio molido	4.9570 kg
Fibra de acero	0.240 kg

Fuente: Autores

9. ELABORACIÓN DE CILINDROS DE CONCRETO

9.1. TRITURADO DE VIDRIO

Inicialmente se recolectaron aproximadamente cincuenta (50) botellas de vidrio, las cuales se limpiaron adecuadamente y se introdujeron en la máquina de los ángeles, donde fueron trituradas durante 10 minutos hasta que adquirieron características similares al agregado fino para su posterior reemplazo en la mezcla.



Figura 9.1 Limpieza y triturado de vidrio
Fuente: Autores

9.2. FABRICACIÓN DE CILINDROS

Es necesario tener en cuenta que debieron realizarse cinco mezclas distintas en base a la cantidad y los tipos de cilindros a ensayar, aunque la metodología empleada para la elaboración de cada uno fue similar, por lo que siempre se emplearon las cantidades de material anteriormente relacionadas (Capítulo 8.2) para cada tipo de cilindro y se procedió de la siguiente manera:

- En un principio se diseñaron los cilindros convencionales junto a los cilindros con fibra de acero, por lo que inicialmente se pesó cada material de acuerdo a las cantidades especificadas.



Figura 9.2 Preparación de agregado fino y agregado grueso para la mezcla
Fuente: Autores

- Luego se preparó la mezcla de forma manual teniendo en cuenta el procedimiento respectivo para el mezclado.



Figura 9.3 Preparación de la mezcla
Fuente: Autores

- Se procedió a agregar la mezcla en las camisas, las cuales fueron limpiadas, engrasadas y ajustadas, para así llenarlas con el material y elaborar cada cilindro siguiendo lo establecido en la Norma Técnica Colombiana (NTC 550), realizando el llenado mediante capas, empleando a su vez la varilla y el martillo que permiten la compactación de la mezcla mediante la cantidad respectiva de golpes.



Figura 9.4 Camisas antes y después del llenado
Fuente: Autores

- Para la elaboración de los cilindros con vidrio molido, se realizó el mismo procedimiento a pesar de que en la preparación de los materiales se tuvo en cuenta además la cantidad de vidrio requerida.



Figura 9.5 Preparación del vidrio molido para la mezcla
Fuente: Autores

- Finalmente se extraen los cilindros de las camisas luego de veinticuatro (24) horas y se sumergen en agua durante determinado tiempo (14, 28 y 56 días) para que adquieran resistencia y puedan ser ensayados debidamente.



Figura 9.6 Proceso de curado y fraguado de los cilindros
Fuente: Autores

10. ANÁLISIS DE RESULTADOS

10.1. ENSAYO A COMPRESIÓN DE CILINDROS

El ensayo a compresión se mide estallando probetas cilíndricas de concreto en una maquina universal de ensayos, un resultado de prueba se da a partir del promedio de por lo menos dos pruebas de resistencia curadas, elaboradas con la misma muestra de concreto y sometidas a ensayos a la misma edad. Los resultados de estas pruebas son usados principalmente para determinar que la mezcla elaborada de concreto cumpla con los requisitos de la resistencia especificada del proyecto.

Para este caso se sometieron las diferentes muestras de concreto con 3%, 5%, 8% de vidrio molido y muestras de concreto convencional, obteniendo los siguientes resultados. Para unos resultados más específicos, revisar el **ANEXO B**.

Tabla 10.1 Promedio de resultados de ensayo a compresión

Resultados de ensayos a compresión (MPa)			
Tipo de mezcla	14 días	28 días	56 días
Convencional	14,73	29,45	35,84
Mezcla con 3% Vidrio Molido	17,35	35,96	40,95
Mezcla con 5% Vidrio Molido	8,61	18,12	41,28
Mezcla con 8% Vidrio Molido	6,81	18,54	33,69
Fibra de acero	8,51	16,21	29,48

Fuente: Autores

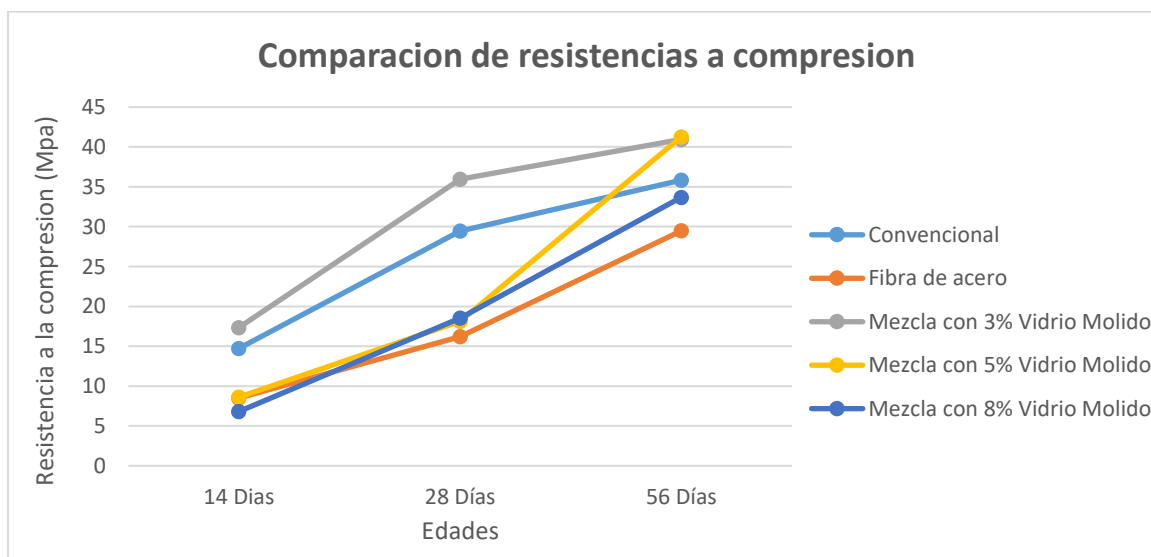


Figura 10.1 Comparación de resistencias promedio a compresión

Fuente: Autores

A partir de los datos obtenidos y en base a la gráfica, se puede determinar que los especímenes de concreto convencional y concreto con 3% de incorporación de vidrio molido alcanzaron la mayor resistencia durante el tiempo analizado

presentando un comportamiento continuo respecto a los demás tipos de mezcla empleados. Además, se deduce que la mezcla de concreto con incorporación de 5% de vidrio molido adquirió mayor resistencia a la edad de 56 días, concluyendo que su velocidad de maduración es lenta.

A continuación, se presenta la comparación entre los cinco (5) diferentes tipos de mezcla analizados y su resistencia a los 14 días:

Tabla 10.2 Resultado de los ensayos de compresión a la edad de 14 días

Promedio esfuerzo a compresión a los 14 días MPa	
Tipo de Mezcla	Resistencia
Convencional	14,73
Mezcla con 3% Vidrio Molido	17,35
Mezcla con 5% Vidrio Molido	8,61
Mezcla con 8% Vidrio Molido	6,81
Fibra de acero	8,51

Fuente: Autores

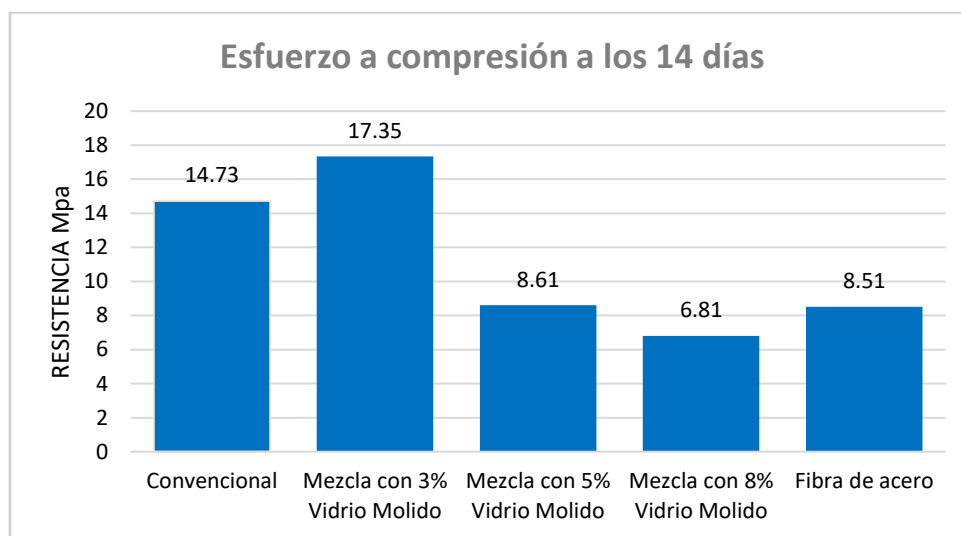


Figura 10.2 Análisis de resistencia a compresión a los 14 días

Fuente: Autores

Teniendo en cuenta la gráfica anterior se analiza el comportamiento de los especímenes en los primeros 14 días y se obtuvo que la mezcla que alcanza la máxima resistencia es la que tiene incorporado 3% de vidrio molido alcanzando una resistencia de 17,35 MPa, y se evidencia que la mezcla que tiene 8% de vidrio molido es la que menos resistencia adquirió deduciendo que a mayor cantidad de vidrio más lenta será la maduración del concreto.

A continuación, se presenta los resultados obtenidos en laboratorio de los especímenes a una maduración de 28 días:

Tabla 10.3 Resultado de los ensayos de compresión a la edad de 28 días

Promedio esfuerzo a compresión a los 28 días MPa	
Tipo de Mezcla	Resistencia
Convencional	29,45
Mezcla con 3% Vidrio Molido	35,96
Mezcla con 5% Vidrio Molido	18,12
Mezcla con 8% Vidrio Molido	18,54
Fibra de acero	16,21

Fuente: Autores

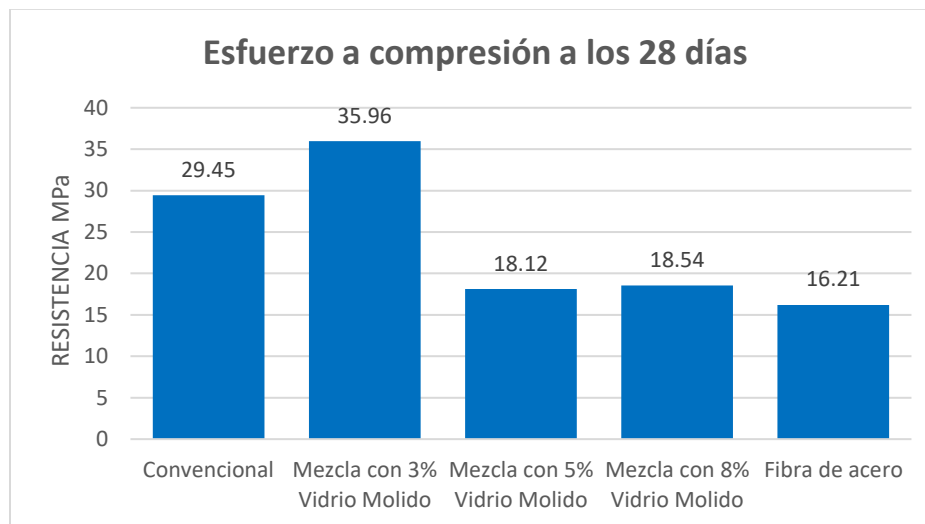


Figura 10.3 Análisis de resistencia a compresión a los 28 días.

Fuente: Autores

A la edad de 28 días se puede evidenciar que la mezcla de concreto con incorporación de 3% de vidrio molido es la que alcanza la resistencia más alta con 35,96 MPa, además se nota que las mezclas de concreto con incorporación de 5% y 8% de vidrio molido para esta edad tienen una velocidad de maduración similar, resaltando también que a los 28 días la mezcla con fibra de acero es la que tiene menor resistencia con solo 16,21 MPa.

La siguiente tabla presenta información de la resistencia obtenida al realizar los ensayos a compresión de los cilindros a los 56 días de edad:

Tabla 10.4 Resultado de los ensayos a compresión a la edad de 56 días

Promedio esfuerzo a compresión a los 56 días MPa	
Tipo de Mezcla	Resistencia
Convencional	38,84
Mezcla con 3% Vidrio Molido	40,95
Mezcla con 5% Vidrio Molido	41,28
Mezcla con 8% Vidrio Molido	33,69
Fibra de acero	29,48

Fuente: Autores

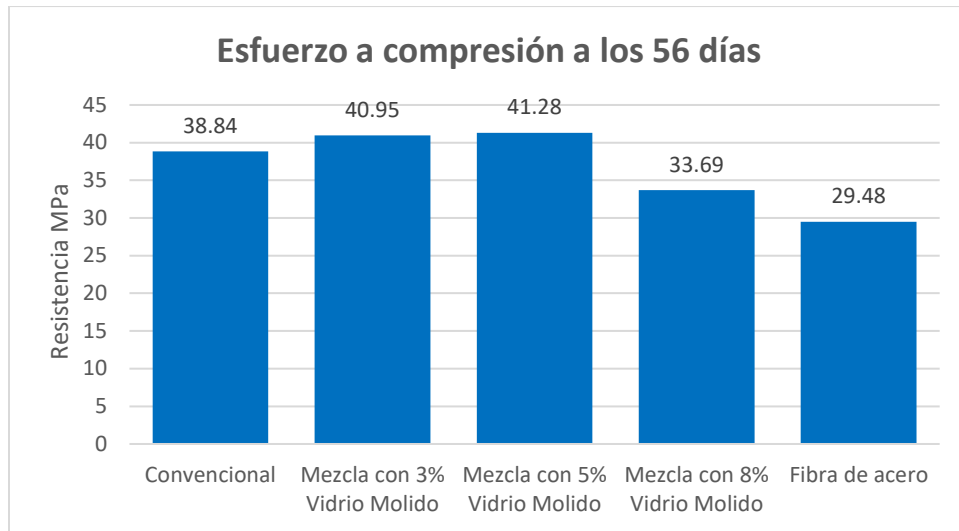


Figura 10.4 Análisis de resistencia a los 56 días.
Fuente: Autores

Finalmente, luego de 56 días de edad de los especímenes se obtiene que la mezcla con incorporación de 5% de vidrio molido es la que alcanzo mayor resistencia a la compresión, durante todo el proceso se evidencio que la mezcla con 3% de vidrio molido tuvo una velocidad de maduración similar a la del concreto convencional y por último se puede concluir que la mezcla con fibra de acero es la que se comportó con menores resistencias en la mayoría de los ensayos realizados.

Luego de analizar cada grafica de los comportamientos que tuvieron los especímenes a las diferentes edades, se determina que la mezcla con incorporación de 3% de vidrio molido es la más factible teniendo en cuenta que obtuvo la mayor resistencia a la compresión a lo largo de la investigación demostrando ser la más viable en este sentido.

La siguiente grafica representa el tiempo de maduración en días de los especímenes de concreto con respecto a la resistencia a compresión obtenida.

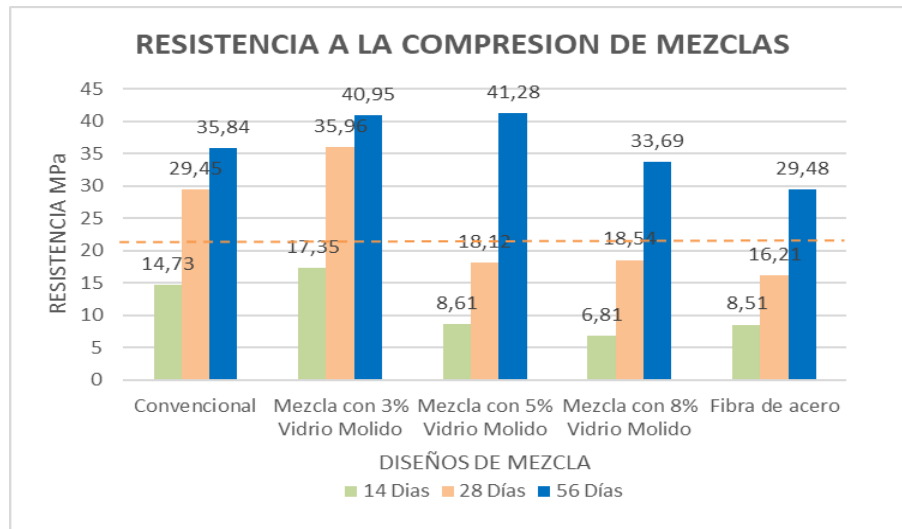


Figura 10.5 Resistencia a la compresión de mezclas
Fuente: Autores

En la figura anterior se puede observar una línea punteada anaranjada que representa la resistencia de diseño estipulada (21MPa), la cual a los 14 días de edad la mezcla de concreto con 3% de vidrio molido fue la que más se acercó a dicha resistencia de diseño con 17,35 MPa, debido a que el vidrio no presenta absorción de agua, hubo una compensación con los demás materiales (cemento, agregado grueso, agregado fino), los cuales presentan propiedades de absorción mayores, generando que para esta edad la resistencia se aproxime a la resistencia de diseño.

Al momento de someter las muestras en la maquina universal para realizar los ensayos a compresión se busca que la deformación sea correctamente distribuida, pero hay diferentes factores y defectos en la preparación de las probetas que pueden provenir de: un mal llenado o mal compactado en las muestras, huecos originados por compactación insuficiente, defectos en el tratamiento del curado o por manejo poco cuidadoso, golpes o movimientos de las probetas inmediatamente después de fabricadas, las cuales producen diferentes tipos de fallas. A continuación, se presenta un collage de fallas obtenidas.

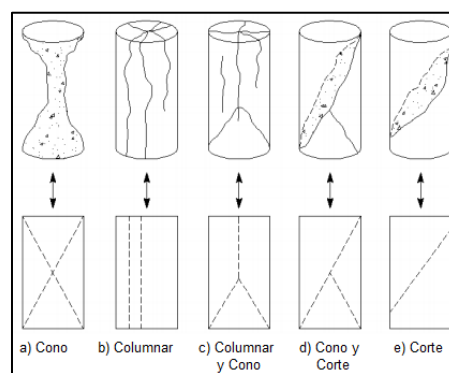


Figura 10.6 Fallas producidas por ensayo a compresión

Fuente: “Efectos de la sílice amorfa en las propiedades cristaloquímicas y mecánicas del hormigón en un medio sano” (Becerra, 2014)

Tabla 10.5 Fallas obtenidas con ensayo de compresión

Falla	Característica
	• Tipo de falla: Corte • Edad: 56 Días • Muestra de concreto convencional
	• Tipo de falla: Cono y corte • Edad: 56 Días • Muestra con 8% de vidrio molido
	• Tipo de falla: Cono y corte • Edad: 56 Días • Muestra con 8% de vidrio molido
	• Tipo de falla: Columnar • Edad: 56 Días • Muestra con 5% de vidrio molido
	• Tipo de falla: Columnar y cono • Edad: 56 Días • Muestra con 3% de vidrio molido

Fuente: Autores

10.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD Y RELACIÓN DE POISSON

El módulo de elasticidad es la relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria correspondiente de un material, representando qué tan rígido es el material ante una carga impuesta, en el caso del concreto el valor aumenta con el tiempo dependiendo de la resistencia, por lo que es dependiente de la mezcla de concreto en particular. En base a esto, se puede afirmar que a mayor resistencia del concreto y mayor densidad, se tiende a obtener mayor módulo de elasticidad, conociendo el límite de la capacidad que tiene el hormigón para deformarse y no fallar.

Para determinar el módulo de elasticidad de cada muestra, se tuvo en cuenta el empleo del deformímetro y las lecturas tanto verticales como horizontales que este arrojaba, así como la normativa establecida en la NTC 4025, así como el esfuerzo aplicado en kg/cm^2 y las deformaciones unitarias respectivas en milímetros (mm), con el objetivo de determinar el módulo de elasticidad práctico a partir de dichos datos, obteniendo los siguientes resultados para los 56 días de edad de cada muestra.

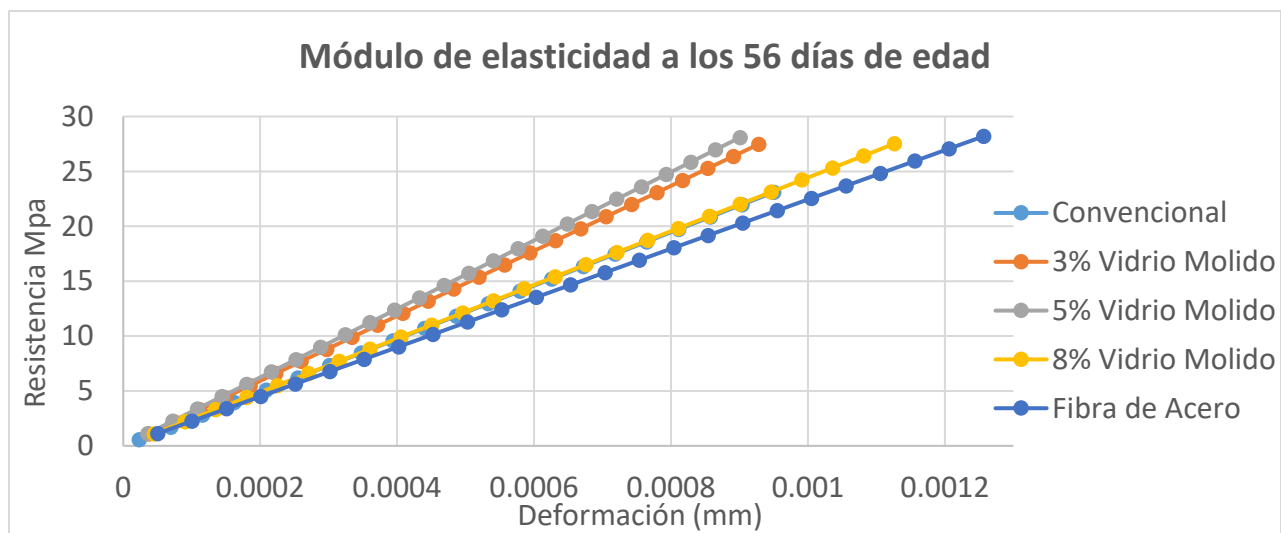


Figura 10.7 Resistencia vs Deformación
Fuente: Autores

Se determina que las muestras que incluyen 3% y 5% de vidrio molido presentan características similares en cuanto a su resistencia dependiendo de la deformación que las mismas presentan, siendo las que evidencian mayor rigidez respecto a las demás muestras estudiadas, esto debido a las características que presenta el vidrio cuando se somete a grandes esfuerzos de compresión como los presentados durante el desarrollo de los ensayos en la máquina universal.

Sumado a ello, se estableció el valor del módulo de elasticidad para cada tipo de mezcla como se muestra a continuación:

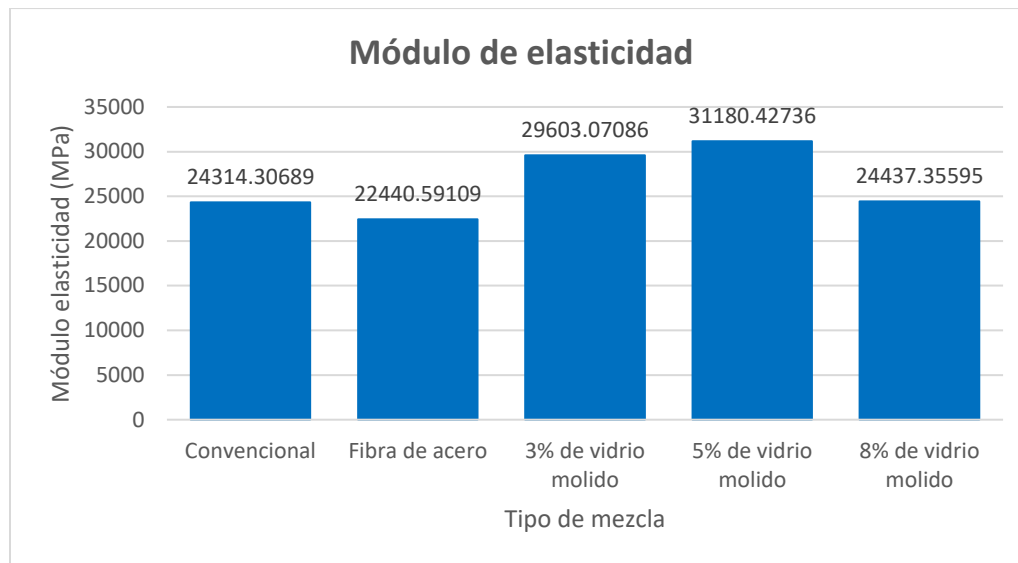


Figura 10.8 Módulo de elasticidad para los diferentes tipos de mezcla
Fuente: Autores

Según se observa, se obtuvo un mayor módulo de elasticidad para los especímenes con 5% de vidrio molido, seguido de las muestras con inclusión de 3% del mismo material, siendo las que mejores características de rigidez presentan respecto a los demás tipos de mezcla empleados, contrario a aquellas de tipo convencional y con fibra de acero, las cuales presentan un módulo de elasticidad menor comparadas con la mezcla inicialmente mencionada, evidenciando que para este caso, el vidrio actúa como un material con alta capacidad elástica respecto al agregado fino comúnmente empleado para el diseño convencional de cilindros de concreto.

Así mismo, se determinó la relación de Poisson para cada mezcla cuando estas presentaban una edad de 56 días, evidenciando que esta oscilaba entre 0.18 y 0.19 (Ver Tabla 10.6), existiendo uniformidad al tener deformaciones verticales bastante similares, por lo que se deduce que cada espécimen analizado presentó comportamientos aceptables en cuanto a deformaciones se refiere, teniendo en cuenta que aquellas muestras cuya relación de Poisson presenta valores inferiores a 0.11 son bastante susceptibles a sufrir fracturas y deformaciones no permanentes.

Para realizar este ensayo, también se empleó el deformímetro, obteniendo lecturas horizontales por debajo del límite inferior, razón por la cual se tomó esta deformación como 0.001 mm al ser este el mínimo valor establecido en la NTC 4025.

Tabla 10.6 Relación de Poisson para cada tipo de mezcla

Tipo de mezcla	Def. horizontal (mm)	Def. vertical (mm)	Eh/Ev
Convencional	0.001	0.00528	0.1893
3% de vidrio molido	0.001	0.00549	0.1821
5% de vidrio molido	0.001	0.00533	0.1876
8% de vidrio molido	0.001	0.00533	0.1876
Fibra de acero	0.001	0.00541	0.1849

Fuente: Autores

10.3. ANÁLISIS DE COSTOS

El análisis de costos se realizó para un metro cúbico (1m³) de concreto, teniendo en cuenta los diferentes diseños de mezcla para cada tipo de espécimen y los costos existentes en el mercado para cada material empleado. A continuación, se encuentran los valores unitarios en pesos colombianos.

Tabla 10.7 Costos para 1m³ de concreto según los tipos de mezcla analizados

Material	Mezcla Convencional (\$/m³)	Mezcla con 3% Vidrio molido (\$/m³)	Mezcla con 5% Vidrio molido (\$/m³)	Mezcla con 8% Vidrio molido (\$/m³)	Mezcla con fibra de acero (\$/m³)
Agregado Grueso	\$ 46.000	\$ 46.000	\$ 46.000	\$ 46.000	\$ 46.000
Agregado Fino	\$ 42.000	\$ 40.500	\$ 39.900	\$ 38.600	\$ 42.000
Cemento	\$ 200.000	\$ 200.000	\$ 200.000	\$ 200.000	\$ 200.000
Vidrio Molido	\$ -	\$ 3.000	\$ 3.000	\$ 3.000	\$ -
Fibra de Acero	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 36.100
Agua	\$ 56.000	\$ 56.000	\$ 56.000	\$ 56.000	\$ 56.000
Total	\$ 344.000	\$ 345.500	\$ 344.900	\$ 343.600	\$ 380.100

Fuente: Autores

En base a lo determinado anteriormente, se evidencia que las muestras con fibra de acero presentan un costo mucho mayor que las demás teniendo en cuenta que dicho material no puede reciclarse como si sucede con el vidrio, por lo que este último representa una ventaja económica respecto a los demás dependiendo la cantidad que se requiera del mismo al momento del diseño de la mezcla, a pesar de que se tuvo en cuenta el costo de dicho material al momento de adquirirlo del sitio de reciclaje al que se acudió.

11. RESULTADOS E IMPACTOS

11.1. RESULTADOS

Tabla 11.1 Resultados esperados

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
Definición de cantidades óptimas de material requerido para el estudio de los especímenes de concreto	Proporciones exactas de los materiales que componen la mezcla	Objetivo específico 1
Obtención de las propiedades del concreto (módulo de elasticidad, resistencia a la compresión) a partir de los ensayos del concreto convencional y con inclusión de vidrio molido y fibra de acero	Ensayos en laboratorio para cada una de las muestras	Objetivo específico 2
Aumento en la resistencia a la compresión de las muestras con vidrio molido y disminución en su módulo de elasticidad	Análisis de los resultados obtenidos	Objetivo específico 3
Aumento de la relación costo beneficio del concreto con vidrio molido.	Análisis del presupuesto del concreto con vidrio comparándolo con el concreto con fibra de acero	Objetivo específico 4

Fuente: Autores

11.2. IMPACTOS

El vidrio es un material que a lo largo de los años ha sido desechado, despreciando así los beneficios o impactos positivos que puede generar al ser reutilizado como porcentaje de una mezcla de concreto.

Tabla 11.2 Impactos

Aspecto	Impacto	Supuesto	Plazo
Social	Concreto con propiedades (resistencia a la compresión, módulo de elasticidad) óptimas para la construcción de edificaciones junto con un gran desarrollo tecnológico	Mayor generación de proyectos constructivos que empleen la adición del material para beneficio de las comunidades e innovación en los materiales de construcción	Largo
Ambiental	Disminución de la contaminación al emplear vidrio molido en las mezclas de concreto	Disminución en la cantidad de materiales que han sido desechados como lo es el vidrio	Mediano
Económico	Disminución de costos de construcción y generación de empleo	Empleo de un material económico y rentable de acuerdo con la relación costo beneficio presentada por el mismo, conllevando a la disminución presupuestal en diferentes proyectos de obra.	Corto

Fuente: Autores

12. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

12.1. CONCLUSIONES

Con la culminación de esta investigación, se pudo concluir que, como se planteó en la justificación el vidrio molido demostró ser un material de fácil manejabilidad al momento de su manipulación durante la limpieza, el tamizado y el proceso de mezcla donde fue incluido, evidenciando además el aporte al medio ambiente que brinda el material, disminuyendo la alteración del equilibrio ecológico que ocasiona la extracción de materias primas, ya que la mayoría son sustancias no renovables, teniendo que este fue reciclado y posteriormente empleado en el desarrollo de la investigación.

Al realizar la correspondiente caracterización física de los materiales empleados como agregados, se planteó el diseño de mezcla y se logró comparar el comportamiento físico mecánico de cada muestra a partir de los ensayos de resistencia a compresión de los especímenes de concreto, por lo que se define que las muestras que contienen 3% de vidrio molido alcanzaron una resistencia mayor respecto a las demás durante toda la etapa investigativa, considerando que este es el porcentaje óptimo de vidrio molido que debe tener una mezcla cuando se requiera el empleo de materiales diferentes a los comunes. Así mismo, se determina que los tres porcentajes de vidrio estudiados como material reemplazante del agregado fino en la mezcla de concreto, presentan resultados irregulares, ya que la resistencia a la compresión no es directamente proporcional a la cantidad de vidrio empleado para cada espécimen, como se evidencia en la Figura 10.5 Resistencia a la compresión de mezclas).

Por otra parte, el uso de fibra de acero presenta un incremento poco significativo en la resistencia a compresión del concreto respecto a las demás muestras durante el desarrollo de la investigación, tal como se puede observar en la Figura 10.1 Comparación de resistencias promedio a compresión), en la cual se analiza el comportamiento de cada muestra para las diferentes edades, determinando que este material posee propiedades que al ser comparadas con las del vidrio molido presentaban menor resistencia al ser sometidas a diferentes esfuerzos.

Se concluye que los especímenes con inclusión de vidrio molido, específicamente los que contienen 3% y 5% de vidrio molido, alcanzan un mayor módulo de elasticidad respecto a las demás muestras analizadas, siendo más favorables en este sentido al presentar menores deformaciones, a diferencia de los demás tipos de mezcla, los cuales se comportaron de manera opuesta al tener en cuenta las propiedades de los materiales que las componen, como el agregado fino y la fibra de acero, y demás factores propios del proceso de diseño y elaboración. En cuanto a la relación de Poisson, cada tipo de mezcla empleado presentó comportamientos aceptables al estar entre 0,18 y 0,20, ya que si fueran valores inferiores a 0,11 demuestran susceptibilidad a fracturas y a deformaciones, indicando además que a mayor cantidad de vidrio molido mayor será dicha relación.

Económicamente hablando, las mezclas con incorporación de vidrio molido se realizan a un costo más bajo, ya que dicha materia prima es reutilizable, por lo tanto, no genera una adición en el costo de la mezcla, caso contrario al concreto con adición de fibra de acero, debido a que dicho material solo se puede adquirir en el mercado generando un incremento al costo de la mezcla, todo ello respecto a la mezcla de concreto convencional.

En un contexto social el empleo de las muestras de concreto con vidrio molido contribuye a la disminución de costos en construcción, además de beneficiar al medio ambiente gracias al ahorro de energía consecuente de la reutilización de los diferentes envases, disminuyendo junto a ello el impacto que generaría utilizar una materia prima de un solo uso, teniendo en cuenta que al reciclarlo sus propiedades se mantienen, además de no generar acumulaciones y desperdicios que afecten ecosistemas.

En base a lo anterior, se determina que la muestra con incorporación de 3% de vidrio molido es la más viable, teniendo en cuenta que este porcentaje demostró una viabilidad estructural y económica durante toda la investigación, tal y como se justificó anteriormente.

12.2. TRABAJOS FUTUROS

- Los resultados de esta investigación son de utilidad siempre y cuando la caracterización de las propiedades físicas de los materiales se realice de manera apropiada, cabe resaltar que la proporción de vidrio molido debe ser de 3% ya que es el porcentaje que demostró el comportamiento óptimo tanto estructural como económicamente.
- Se recomienda someter los envases de vidrio en un proceso de lavado, secado, triturado y tamizado, con el fin de alcanzar propiedades similares a las del agregado fino y la adherencia entre las partículas de vidrio y los diferentes materiales agregados a la mezcla.
- Se espera que este proyecto sea un aporte para aquellas investigaciones que se interesen en el comportamiento del concreto adicionado con material reciclable en este caso el vidrio molido, se espera que estos materiales sustentables aporten un beneficio tanto social como ambiental de tal manera que minimice el impacto que trae crear nuevos procedimientos de construcción y así mismo contribuyan en el campo de la innovación.

BIBLIOGRAFÍA

- Arango, S., & Zapata, A. (2013). *Influencia de la fibra de vidrio en las propiedades mecánicas de mezclas de concreto*. Medellín: Universidad EAFIT.
- Caballero, K. (2017). Propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras metálicas. *Prisma Tecnológico*, 8(1), 18-23.
- Cano, J., & Cruz, C. (2017). *Análisis de mezclas de concreto con proporciones de vidrio molido, tamizado y granular como aditivo, a fin de aumentar la resistencia a la compresión del hormigón*. Pereira: Universidad Libre Seccional de Pereira.
- Carpinteri, A., Cantera, A., Fortese, D., & Ronchei, M. (2019). Evaluación de falla probabilística de compuestos de fibra de vidrio. *Estructuras Compuestas*, 160, 1113-1170.
- Castiblanco, C., & Carrero, L. (2015). *Estudio teórico y experimental del comportamiento del hormigón con materiales no convencionales: fibras de vidrio y fibras de carbono, sometido a esfuerzos de compresión*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia.
- Catalán, C. (2013). *Estudio de la influencia del vidrio molido en hormigones grado H15, H20, Y H30*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- ESCOM. (28 de Abril de 2016). Recuperado el 11 de Noviembre de 2019, de <https://www.atescom.es/fibra-vidrio-propiedades-aplicaciones/>
- Fibraplus. (17 de Mayo de 2018). Recuperado el 31 de Agosto de 2018, de <http://fibraplus.com/concreto-reforzado-fibra-vidrio/>
- García, B. (2017). *Efecto de la fibra de vidrio en las propiedades mecánicas del concreto $f'c=210$ Kg/cm² en la ciudad de Puno*. Puno: Universidad Nacional del Altiplano.
- Hablando en vidrio. (25 de Enero de 2019). Recuperado el 11 de Noviembre de 2019, de <https://hablandoenvidrio.com/reciclar-vidrio-es-cuidar-el-medioambiente/>
- Leguizamón, M., & Beltrán, M. (2019). *Estudio de las propiedades mecánicas que presenta el concreto geopolímero a base de ceniza de cascarilla de arroz producida en el departamento del Meta, y reforzado con fibras de acero*. Villavicencio: Universidad Santo Tomás Sede Villavicencio.
- Muñoz, C. (2007). *Comportamiento mecánico del hormigón reforzado con fibra de vidrio*. Valdivia: Universidad Austral de Chile.
- Pérez, J. (s.f.). *Patologías de estructuras de hormigón armado*. La Coruña: Universidade da Coruña. Recuperado el 31 de Agosto de 2019, de <https://www.udc.es/dep/dtcon/estructuras/ETSAC/Publicaciones/pub-val/Patologia/trasparencias%20patologia.pdf>
- Rivera, G. (s.f.). *Concreto Simple*. Popayán: Universidad del Cauca.
- Sánchez de Guzmán, D. (2011). *Tecnología del concreto (Tomo 2)*. Bogotá D.C.: ASOCRETO.

Uriarte, J. (5 de Junio de 2019). *Características*. Recuperado el 11 de Noviembre de 2019, de <https://www.caracteristicas.co/vidrio/>

Walhoff, G. (2017). *Influencia del vidrio molido en la resistencia a la compresión del concreto y costos de fabricación, comparado con el concreto convencional, Barranca-2016*. Huaraz: Universidad Nacional "Santiago Antúnez de Mayolo".

ANEXOS

ANEXO A. DISEÑO DE MEZCLA

ANEXO B. RESULTADOS DE ENSAYOS A COMPRESIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE MEZCLA EMPLEADOS