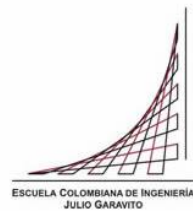


# **Maestría en Ingeniería Civil**

## **Propiedades mecánicas de morteros elaborados con arena de concreto reciclado, arena de sílice y fibra de vidrio**

**Ricardo Alexander Salgado Burgos**

Bogotá D.C., 3 de Noviembre de 2016



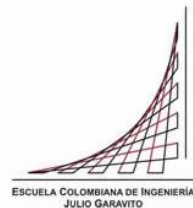


**Propiedades mecánicas de morteros elaborados con arena de  
concreto reciclado, arena de sílice y fibra de vidrio**

**Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con  
énfasis en Estructuras**

Nancy Torres Castellanos  
Directora

Bogotá D.C., 3 de Noviembre de 2016





La tesis de maestría titulada “Propiedades mecánicas de morteros elaborados con arena de concreto reciclado, arena de sílice y fibra de vidrio”, presentada por Ricardo Alexander Salgado Burgos, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Estructuras.

Director de la tesis

Ing. Nancy Torres Castellanos

Jurado

Ing. Sandra Rocio Jerez

Jurado

Ing. Ricardo Matallana

Bogotá, D.C., 1 de Noviembre de 2016



*A mi esposa, hijos, padre, madre, hermano  
primos y tíos que han sido el apoyo en todas las  
circunstancias de la vida para ser la persona  
que actualmente soy y por siempre gracias a  
Dios por darme la salud para afrontar cada reto.*

*"La familia es base de la sociedad y el lugar  
donde las personas aprenden por vez primera  
los valores que les guían durante toda su vida"*

*Papa Juan Pablo II*





# AGRADECIMIENTOS

A todas personas que de una u otra forma contribuyeron para el logro de esta investigación en especial:

A la Escuela Colombiana de Ingeniería por aportar la infraestructura y los docentes que en cada una de sus clases forjaron y fortalecieron los conocimientos que ayudan a la formación de mejores profesionales que hacen de Colombia una mejor nación.

A mi directora de tesis Dra. Nancy Torres por su comprensión, tiempo y conocimiento que brindo con la mejor disposición para poder desarrollar este trabajo.

Al personal de laboratorio en especial al señor Ramón Torres que fue un gran colaborador y brindo su amplia experiencia, paciencia y tiempo para orientarme en cada uno de los ensayos de este trabajo.

A mi esposa Gloria e hijos que con su paciencia, motivación y colaboración logro que se pudiera realizar este proyecto.

A mi padre, madre y hermano que son las personas que han estado en todos los aspectos de mi vida motivándome cada día a ser mejor ciudadano.

A mi primo-hermano Edgar Eduardo que como siempre lo ha hecho en mi vida estuvo en cada aspecto de mi tesis para colaborarme y darme ánimo en la consecución de este nuevo logro.

A mis tíos que con su sabiduría y paciencia pudieron darme la oportunidad de dedicarle el tiempo al desarrollo de este proyecto.

# RESUMEN

El trabajo de grado de maestría en ingeniería civil con énfasis en estructuras, tuvo como finalidad evaluar el comportamiento de morteros de cemento elaborados con arena de sílice, arena obtenida de concreto reciclado, plastificante y adherente, reforzados con fibra de vidrio. Se evaluaron siete diferentes mezclas, en cinco de ellas variando el contenido de arena de sílice, arena reciclada incluyendo fibra de vidrio, en las dos restantes no se usó fibra de vidrio, las variables usadas en las mezclas fueron las siguientes (0%-100% sin fibra, 0%-100% con fibra, 25%-75% con fibra, 50%-50% con fibra, 75%-25% con fibra, 100%-0% con fibra, 100%-0% sin fibra). Todas las mezclas manejaron una relación arena: cemento de 1:1, la relación agua/cemento fue 0.4 y el contenido de fibra fue del 3.5%. Se analizaron las propiedades de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, flexión, velocidad de pulso ultrasónico, ISAT, porosidad, contracción, resistencia a los sulfatos, resistencia al desgaste por chorro de arena, sortividad. Los resultados de los ensayos indicaron que se obtenían mejores resistencias a la flexión cuando se tuvo una vinculación del 25% de material reciclado obteniendo mejoras del 125% respecto a las muestras patrón, en los demás ensayos realizados esta dosificación fue la de mejor comportamiento entre las mezclas con fibra y material reciclado.

**Palabras clave:** Agregados reciclados, fibra de vidrio, arena sílice, propiedades mecánicas,

## ABSTRACT

The work of magister degree in civil engineering with an emphasis on structures, aimed to evaluate the behavior of cement mortars made with silica sand, recycled concrete sand obtained, plasticizer and adhesive, reinforced with fiberglass. Seven different mixtures were evaluated in five of them varying the content of silica sand, recycled sand including fiberglass, not in the remaining two glass fiber was used, the variables used in the mixtures were the following (0% -100 % without fiber, 0% -100% fiber, 25% -75% fiber, 50% -50% fiber, 75% -25% fiber, 100% -0% fiber, 100% -0% without fiber). All blends managed a sand: cement ratio of 1: 1 water / cement ratio was 0.4 and the fiber content was 3.5%. properties compressive strength, modulus of elasticity, flexural ultrasonic pulse velocity, ISAT, porosity, shrinkage, sulfate resistance, wear resistance sandblasting, sorptivity analyzed. The test results indicated that best flexural strengths were obtained when a link 25% of material was recycled obtaining improvements of 125% compared to the standard samples in the other trials this dosage was the best performing among mixtures with fiber and recycled material.

**Keywords:** Recycled aggregates , glass fiber , silica sand , mechanical properties

# CONTENIDO

<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>IX</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>XII</b>
<b>CONTENIDO</b> .....	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>1 OBJETIVOS</b> .....	<b>3</b>
1.1 Objetivo General .....	3
1.2 Objetivos Específicos .....	3
<b>2 ESTADO DEL ARTE</b> .....	<b>5</b>
2.1 Panorama de los escombros .....	5
2.2 Concreto con Agregados Reciclados .....	9
2.3 Concreto reforzado con fibra de vidrio .....	13
<b>3 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	<b>17</b>
3.1 Caracterización de los materiales de las mezclas .....	18
3.1.1 Arena reciclada .....	18
3.1.2 Arena de sílice .....	19
3.1.3 Cemento .....	20
3.1.4 Fibra de vidrio .....	20
3.2 Elaboración de mezclas para ensayos .....	21
3.3 Nomenclatura de probetas utilizada .....	23
3.4 Ambiente de curado .....	23
3.5 Edades de ensayo .....	24
3.6 Ensayos realizados a las probetas .....	24
3.6.1 Ensayo de medición de la tasa de absorción inicial ISAT .....	24
3.6.2 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico .....	25
3.6.3 Ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad .....	26
3.6.4 Ensayo de sortividad .....	27
3.6.5 Ensayo de absorción, densidad y volumen de poros permeables .....	28
3.6.6 Ensayo a la flexión .....	29

3.6.7	Ensayo resistencia a sulfatos .....	29
3.6.8	Ensayo contracción.....	30
3.6.9	Ensayo abrasión por chorro de arena .....	31
<b>4</b>	<b>RESULTADOS Y ANALISIS .....</b>	<b>33</b>
4.1	Propiedades en estado fresco.....	33
4.2	Propiedades en estado endurecido.....	35
4.2.1	Tasa de absorción inicial ISAT .....	35
4.2.2	Resistencia a compresión .....	38
4.2.3	Velocidad de pulso ultrasónico VPU.....	40
4.2.4	Módulo de elasticidad .....	41
4.2.5	Sortividad.....	42
4.2.6	Absorción, masa unitaria y porosidad.....	44
4.2.7	Resistencia a la flexión .....	48
4.2.8	Resistencia a sulfatos .....	50
4.2.9	Contracción .....	54
4.2.10	Abrasión .....	55
<b>5</b>	<b>APLICACIÓN PRÁCTICA .....</b>	<b>57</b>
5.1	Selección de mezcla.....	57
5.2	Revisión económica.....	58
5.3	Producción .....	59
<b>6</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>65</b>
6.1	Conclusiones.....	65
6.2	Recomendaciones.....	66
<b>A.</b>	<b>Anexo: MEDIDAS DE PROTECCIÓN PERSONAL PARA EL MANEJO DE LOS MATERIALES .....</b>	<b>69</b>
	Arena de sílice .....	69
	Fibra de vidrio .....	71
<b>B.</b>	<b>Anexo: Datos Resultados Ensayo Tasa De Absorción Inicial.....</b>	<b>73</b>
<b>C.</b>	<b>Anexo: Datos Resultados Ensayo Resistencia A Compresión .....</b>	<b>75</b>
<b>D.</b>	<b>Anexo: Datos Resultados Ensayo Velocidad De Pulso Ultrasónico .....</b>	<b>77</b>
<b>E.</b>	<b>Anexo: Datos Resultados Ensayo Modulo De Elasticidad .....</b>	<b>79</b>
<b>F.</b>	<b>Anexo: Datos Resultados Ensayo Sortividad .....</b>	<b>81</b>
<b>G.</b>	<b>Anexo: Datos Resultados Ensayo Absorción, Masa Unitaria Y Porosidad 83</b>	<b>83</b>
<b>H.</b>	<b>Anexo: Datos Resultados Ensayo Resistencia A La Flexión .....</b>	<b>85</b>
<b>I.</b>	<b>Anexo: Datos Resultados Ensayo Resistencia A Sulfatos .....</b>	<b>87</b>
<b>J.</b>	<b>Anexo: Datos Resultados Ensayo Contracción .....</b>	<b>89</b>
<b>K.</b>	<b>Anexo: Datos Resultados Ensayo Abrasión.....</b>	<b>91</b>

<b>7</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>93</b>
----------	--------------------------	-----------





# LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Composición de residuos construcción-demolición.....	6
Figura 2 Curva granulométrica arena reciclada.....	19
Figura 3 Curva Granulométrica arena de sílice .....	19
Figura 4 Preparación de formaletas para fundida .....	22
Figura 5 Ensayos en estado fresco de las mezclas .....	22
Figura 6 Montaje de ensayo ISAT.....	25
Figura 7 Toma de datos ensayo velocidad de pulso ultrasónico .....	26
Figura 8 Montaje de cilindro con deformímetro para ensayo de módulo de elasticidad y resistencia a la compresión.....	27
Figura 9 Muestras en ensayo de sortividad.....	28
Figura 10 Ensayo de viga a flexión.....	29
Figura 11 Tanque con solución de sulfatos para inmersión de probetas .....	30
Figura 12 Comparador digital con vigueta en medición .....	31
Figura 13 Montaje en equipo de ensayo abrasión chorro de arena y rueda metálica.....	32
Figura 14 Asentamiento de mezclas.....	34
Figura 15 Temperaturas de mezcla en estado fresco .....	34
Figura 16 Masa unitaria en estado fresco.....	35
Figura 17 ISAT comparativo del promedio por mezcla a la edad de 35 días .....	36
Figura 18 ISAT comparativo del promedio por mezcla a la edad de 90 días .....	37
Figura 19 Comparativo de resistencia a compresión. ....	38
Figura 20 Diferencia de falla cilindros, Cilindro sin fibra (izq.), Cilindro con fibra (der) .....	39
Figura 21 Cono de falla por compresión.....	39
Figura 22 Comparativo de velocidades de pulso ultrasónico .....	40
Figura 23 Comparativo de módulo de elasticidad .....	42
Figura 24 Comparativo tasa inicial de absorción.....	43
Figura 25 Comparativo tasa secundaria de absorción .....	44
Figura 26 Porcentaje de absorción a la edad 35 días .....	45
Figura 27 Masa unitaria a la edad de 35 días .....	46
Figura 28 Porcentaje de poros a la edad de 35 días.....	47
Figura 29 Correlación entre masa unitaria versus porcentaje de poros .....	48
Figura 30 Comparación de módulo de rotura .....	49

Figura 31 Comparación del momento de falla de vigas a flexión, Mezcla con fibra (izq.); mezcla sin fibra (der) .....	49
Figura 32 Vigueta en comparador digital luego de ser extraída de la concentración de sulfatos.....	51
Figura 33 Afectación en la superficie del cilindro por sulfatos .....	51
Figura 34 Cambios volumétricos de viguetas en concentración de sulfatos .....	52
Figura 35 Comparativo de VPU antes y después de exposición a sulfatos .....	53
Figura 36 Comparativo de resistencias a compresión entre cilindros expuestos a sulfatos y testigos.....	53
Figura 37 Cambios volumétricos en cuarto de humedad y temperatura controlada .....	54
Figura 38 Comparativo ensayo de desgaste disco metálico y chorro de arena .....	55
Figura 39 Plaqueta tipo deck procedimiento con endurecedor de superficie .....	60
Figura 40 Formaleta tipo marco .....	60
Figura 41 Formaleta tipo bandeja .....	61
Figura 42 Plaqueta tipo deck procedimiento tipo bandeja .....	62
Figura 43 Secciones de plaqueta para ensayo de abrasión .....	62
Figura 44 Montaje para ensayo a flexión de plaqueta tipo deck.....	63
Figura 45 Momento de la falla plaqueta tipo deck en ensayo a flexión .....	63
Figura 46 Ejemplos de prefabricados para urbanismo.....	64

# LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 2-1 Datos sobre recuperación de concreto en el entorno mundial (Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible WBCSD., 2009) .....	7
Tabla 2-2 Recolección y aprovechamiento de residuos de construcción(Chávez et al., 2010) .....	8
Tabla 2-3 Proyección de producción total, aprovechamiento y tratamiento RCD en Bogotá(Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, 2012).....	9
Tabla 3-1 Tipos de mezcla y nomenclatura utilizada .....	17
Tabla 3-2 Caracterización físico química del cemento utilizado .....	20
Tabla 3-3 Nomenclatura de probetas .....	23
Tabla 3-4 Nomenclatura alfabética probetas cilíndricas.....	23
Tabla 4-1 Clasificación de la absorción capilar según valor de ISAT (ml/m <sup>2</sup> .s)(Torres, 2014) .....	37
Tabla 4-2 Clasificación del concreto de acuerdo con los valores de velocidad de pulso ultrasónico (Torres, 2014) .....	41
Tabla 4-3 Valores para determinar la calidad por porcentaje de absorción(CYTED, 1997) .....	45
Tabla 4-4 Clasificación de acuerdo a la porosidad (CYTED, 1997).....	47
Tabla 4-5 Revisión factor k relacionando resistencia a compresión y módulo de rotura ..	50
Tabla 5-1 Matriz comparativa de resultados ensayos .....	57
Tabla 5-2 Precio por m <sup>3</sup> de concreto mezcla tipo M2.....	58
Tabla 5-3 Precio por m <sup>3</sup> de concreto mezcla tipo M3.....	59
Tabla B-1 Resultados promedios ensayo ISAT a 10 min edades 35 y 90 días.....	73
Tabla B-2 Resultados promedios ensayo ISAT a 20 min edades 35 y 90 días.....	73
Tabla B-3 Resultados promedios ensayo ISAT a 20 min edades 35 y 90 días.....	73
Tabla C-1 Resultados ensayo resistencia a compresión a 3 días .....	75
Tabla C-2 Resultados ensayo resistencia a compresión a 37 días .....	75
Tabla C-3 Resultados ensayo resistencia a compresión a 90 días .....	76
Tabla D-1 Resultados promedio ensayo velocidad de pulso ultrasónico .....	77
Tabla E-1 Resultados promedio ensayo Modulo de elasticidad .....	79
Tabla F-1 Resultados promedio ensayo sortividad tasa inicial de absorción .....	81

Tabla F-2 Resultados promedio ensayo sortividad tasa secundaria de absorción .....	81
Tabla G-1 Resultados promedio ensayo absorción, masa unitaria y porosidad .....	83
Tabla H-1 Resultados ensayo flexión .....	85
Tabla I-1 Resultados de mediciones viguetas .....	87
Tabla I-2 Diámetros y alturas promedio antes y después de exposición a sulfatos .....	87
Tabla I-3 Resultados promedios velocidades de pulso .....	88
Tabla I-4 Resultados promedio de Resistencias a compresión cilindros en sulfatos y testigos .....	88
Tabla J-1 Resultados promedio ensayo contracción.....	89
Tabla K-1 Resultados ensayo abrasión .....	91

# INTRODUCCIÓN

Una de las grandes problemáticas en el sector de la construcción es la gran cantidad de escombros que se producen durante la ejecución de los proyectos, algunos de estos residuos son dispuestos en zonas como rellenos sanitarios, rellenos constructivos y en menor cantidad reutilizados.

Dentro de los residuos de construcción y demolición, el concreto es uno de los materiales que actualmente en Bogotá se está reciclando y se puede encontrar en el mercado ya procesado, como agregados producidos mediante procesos de trituración de los escombros de concreto, debidamente clasificados que pueden ser reutilizados durante el proceso constructivo de elementos de concreto de nuevos proyectos. Siendo así se promueve la utilización de estos materiales y la factibilidad de usarlos en nuevos productos además de reducir el impacto al medio ambiente al evitar disponer estos materiales en los rellenos sanitarios.

Una de las alternativas para usar el material reciclado y que se propone en este proyecto es el uso del mismo en una tecnología que se está usando recientemente en Colombia: el GRC<sup>1</sup>. Este material está elaborado con arenas, cemento, fibras de vidrio cortas, que pueden ser proyectadas<sup>2</sup> o premezcladas y también aditivos; este material tiene grandes ventajas, entre ellas las siguientes:

- Gran resistencia al impacto.

---

<sup>1</sup> siglas que significan *Glassfibre Reinforced Cement* (Comino et al., 1996)

<sup>2</sup> Mortero lanzado mediante máquina que incorpora la fibra en el proceso.

- Alta resistencia a la flexión.
- Pueden elaborarse elementos esbeltos que facilitan el transporte, la manipulación, mano de obra (ergonomía).
- Aptitud para el modelado de formas complejas.
- Se puede brindar a los elementos gran variedad de colores y texturas.

En esta investigación se vincularon dentro de este material compuesto, arenas provenientes de material reciclado en reemplazo parcial o total de la arena de sílice y planteando como objetivo para esta tesis la caracterización de las diferentes mezclas, manteniendo el contenido de fibra y la relación agua cemento; a partir de los resultados obtenidos se podrá evaluar la posibilidad de un potencial uso de este material en elementos prefabricados y generar una alternativa de utilización de materiales reciclados en diversos usos, lo cual ayudará a mitigar el impacto de la industria de la construcción al medio ambiente.

# **1 OBJETIVOS**

## **1.1 Objetivo General**

Caracterizar mediante algunas propiedades mecánicas los morteros elaborados con arena reciclada, arena de sílice y fibra de vidrio.

## **1.2 Objetivos Específicos**

- Determinar las capacidades a la flexión, compresión y durabilidad de elementos elaborados con arena de sílice, arena reciclada y reforzadas con fibra de vidrio.
- Determinar la dosificación de arena reciclada más adecuada teniendo en cuenta el costo y las solicitaciones necesarias para su uso en elementos prefabricados reforzados con fibra de vidrio.
- Elaborar un elemento prefabricado (plaqueta tipo deck) para urbanismo que sea competitivo en el mercado (ambiental y económicamente) a partir de los resultados obtenidos.



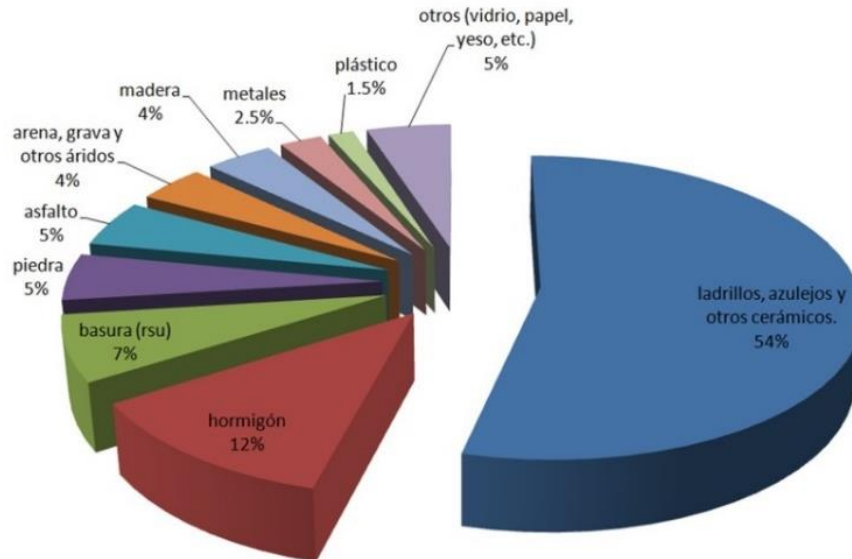


## **2 ESTADO DEL ARTE**

La bibliografía consultada respecto a pruebas de GRC con materiales reciclados producto de escombros de concreto es nula; sin embargo, en el estudio del GRC e independientemente del uso de concreto con agregado reciclado, se encuentran investigaciones y documentos que orientaron este trabajo recopiladas en el siguiente estado del arte. A continuación, se hace una revisión de la problemática de escombros a nivel mundial y local; posteriormente se revisa estado del arte en concretos reciclados y finalmente algunas investigaciones del GRC.

### **2.1 Panorama de los escombros**

Al empezar un nuevo proyecto y durante la ejecución es normal que se generen escombros que se convierten en un problema ambiental debido a la mala administración de estos residuos; algunos líderes mundiales y locales han buscado generar una conciencia que conduzca al aprovechamiento y buena disposición de estos recursos; estudiando la situación internacional en España se ha podido determinar que aproximadamente en una obra de construcción convencional en el proceso de demolición los porcentajes de los residuos que se generan de los diferentes materiales están representados en la Figura 1, la cual fue sintetizada del escrito “la pesada carga de los escombros” (De las Heras, 2002). De esta figura se identifica que el concreto ocupa la segunda posición dentro de los materiales resultantes en una demolición.

**Figura 1** Composición de residuos construcción-demolición

Desde los años 80 la normatividad internacional se ha propuesto regular la disposición y manejo de estos materiales, con lo que las potencias mundiales han logrado altos porcentajes de reutilización de residuos; según el informe del Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD por sus siglas en inglés) “*muchos países tienen esquemas de reciclaje para RCD<sup>3</sup> y se alcanzan altos niveles de recuperación en países como Holanda, Japón, Bélgica y Alemania*” (Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible WBCSD., 2009), información que se describe con más detalle en la Tabla 2-1. La mayoría de estos agregados reciclados se usan sub bases según lo indica este informe. El agregado reciclado compite principalmente contra su coste en el proceso de la producción; sin embargo, la mayoría de veces el costo es menor que explotarlo en canteras o minas, adicionalmente el beneficio ambiental es incomparable entre los dos casos.

<sup>3</sup> RCD: Residuos de construcción y demoliciones.

**Tabla 2-1** Datos sobre recuperación de concreto en el entorno mundial (Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible WBCSD., 2009)

PAÍS	TOTAL RCD (Mt)	TOTAL RCD RECUPERADOS (Mt)	% DE RCD RECUPERADOS
Alemania <sup>15</sup>	201	179	89
Australia <sup>16</sup>	14	8	57
Bélgica <sup>17</sup>	14	12	86
Canadá <sup>18</sup>	No disponible	8 (concreto reciclado)	No disponible
España <sup>19</sup>	39	4	10
Estados Unidos <sup>20</sup>	317 (incl. 155 de concreto)	127 (concreto reciclado)	82
Francia <sup>21</sup>	309	195	63
Holanda <sup>22</sup>	26	25	95
Inglaterra <sup>23</sup>	90	46	50 – 90
Irlanda <sup>24</sup>	17	13	80
Japón <sup>25</sup>	77	62	80
Noruega <sup>26</sup>	No disponible	No disponible	50 – 70
Portugal	4	Mínimo	Mínimo
República Checa <sup>27</sup>	9 (incl. 3 de concreto)	1 (concreto reciclado)	45 (concreto)
Suiza <sup>28</sup>	7 (incl. 2 de concreto)	2	casi 100
Taiwán <sup>29</sup>	63	58	91
Tailandia <sup>30</sup>	10	No disponible	No disponible

En América Latina la cultura de reciclaje la lidera Brasil, quien fue el primer país donde fue instalada una planta dedicada al reciclaje de residuos de concreto producto de demolición o de residuos de construcción; algunos municipios vienen implantando acciones para reciclar escombros como lo es el caso de Salvador, Belo Horizonte, Ribeirao Preto, Londrina y Sao Paulo (Chávez, Mejía, & Bernal, 2010).

En Colombia en los últimos años se ha empezado a tomar en cuenta esta problemática con resultados satisfactorios como lo indica la Tabla 2-2, donde se observa que tres ciudades principales ya figuran en las estadísticas de reutilización de residuos de construcción; estos datos son extraídos de los planes de desarrollo municipales 2008-2011.

**Tabla 2-2** Recolección y aprovechamiento de residuos de construcción (Chávez et al., 2010)

CIUDAD	RECOLECCION (T/AÑO)	APROVECHAMIENTO (%)
MEDELLIN	667.300	30%
CALI	396.000	45%
IBAGUE	89.000	17%

Actualmente en Bogotá existe un decreto que regula el manejo de estos residuos, se trata del Decreto 357 de 1997, "Por el cual se regula el manejo, transporte y disposición final de escombros y materiales de construcción.", aunque en este documento no se trata la temática de reutilización de escombros. Desde el año 2011 las políticas colombianas han orientado decretos que están fijando plazos para mejorar esta problemática tratando de obligar a los contratistas y proyectistas en proyectos del estado, a reutilizar dentro de la obra ciertos porcentajes de residuos, que deberán ir incrementando año tras año; esta resolución es la 2397 de 2011 de Abril "*Por la cual se regula técnicamente el tratamiento y/o aprovechamiento de escombros en el Distrito Capital*". Los proyectos deberán aprovechar los escombros desde un 10 % por m<sup>2</sup> de construcción esto refiriéndose al uso de este material en elementos no estructurales como lo pueden ser andenes, fachadas, etc. y estos deberán incrementar en un 5 % por año hasta llegar a un mínimo del 25 %. Aquellas empresas que no cumplan con este requerimiento tendrán multas equivalentes a 000 salarios mínimos mensuales vigentes, además del cierre temporal o definitivo del establecimiento. La disposición final de los residuos que no sean aprovechables deberá colocarse en paisajes que se encuentren degradados tales como minas y canteras abandonadas, que no presenten riesgos a la comunidad. En el plan de gobierno Bogotá Humana se encuentra un programa llamado "Basura Cero" que tiene dentro de su contenido un proyecto llamado "Escombros Cero" el cual fue expuesto en el Primer foro internacional para la gestión y control de los RCD. Allí se mostró una proyección en la cual para la ciudad se deberá tener para el año 2021 un aprovechamiento del 45% de los escombros producidos entre sector privado y público como lo indica la Tabla 2-3. Estas medidas nos proporcionan un panorama favorable en el objetivo de lograr una reducción del impacto al medio ambiente cuando se elaboran obras.

**Tabla 2-3** Proyección de producción total, aprovechamiento y tratamiento RCD en Bogotá(Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos, 2012)

Año	Sector privado	Sector publico	Total	Material a plantas de Tratamiento (M3)	Material aprovechable (M3)	Total material a recuperar
2012	4.942.781	1.720.454	6.663.235	1.600.402	662.096	2.262.498
2013	5.140.493	2.851.599	7.992.092	1.735.309	719.999	2.455.308
2014	5.346.112	2.892.277	8.238.389	1.883.832	783.046	2.666.879
2015	5.559.957	3.002.486	8.562.443	2.045.417	851.698	2.897.114
2016	5.782.355	3.125.219	8.907.574	2.221.225	926.455	3.147.680
2017	6.013.649	3.236.703	9.250.352	2.412.526	1.007.864	3.420.390
2018	6.254.195	3.360.762	9.614.957	2.620.699	1.096.521	3.717.220
2019	6.504.363	3.473.623	9.977.986	2.847.249	1.193.075	4.040.324
2020	6.764.538	3.599.116	10.363.654	3.093.816	1.298.234	4.392.051
2021	7.035.119	3.713.468	10.748.587	3.362.187	1.412.769	4.774.956
<b>Total</b>			<b>90.319.270</b>	<b>23.822.662</b>	<b>9.951.757</b>	<b>33.774.419</b>

## 2.2 Concreto con Agregados Reciclados

Respecto a este tema se encuentran diversos estudios que propenden a mitigar el impacto al ambiente de los residuos de concreto en Colombia y en otras partes del mundo. Algunas de estas investigaciones hacen referencia a los menores valores de resultados obtenidos en la comparación de las diferentes propiedades de concretos conteniendo agregados reciclados y agregados naturales; algunos de estos estudios se han llevado a cabo por estudiantes del Posgrado de la Escuela Colombiana de Ingeniería, enfocándose principalmente en el análisis de los concretos donde se han hecho reemplazos de porciones de material de agregado grueso natural por agregado grueso reciclado. Según Bojacà & Torres (2013) se podrían realizar sustituciones de agregado grueso hasta un 40 % sin tener mayores cambios en lo que se refiere a la reducción de los valores de las propiedades mecánicas del concreto. En el estudio de la resistencia a la flexión si hay disminución cuando se habla de porcentajes de reemplazo de 40 % mientras en porcentajes de reemplazo de 20 % fue similar a la muestra de control. Otra investigación realizada en la Escuela por Laverde (2014) indicó que para las mezclas con mayor porcentaje de agregado reciclado al revisar los resultados del módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión

son más bajos que para concretos con agregado natural ya que cuando se realizó un concreto con 100% de ACR<sup>4</sup> tiene una reducción estimada del 20% al 25%, con respecto a un concreto con agregados naturales. En cuanto a las propiedades eléctricas y de durabilidad medidas mediante ensayos de resistividad, impedancia, sortividad y permeabilidad al ion cloruro, se ven afectadas con el aumento del porcentaje de agregado reciclado y la relación agua/cemento.

Respecto al uso de agregado fino en reemplazo de arena natural en Portugal los investigadores Evangelista & de Brito (2007) realizaron ensayos que permitieron obtener algunas propiedades mecánicas de concretos con estos agregados como lo fueron resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad y resistencia a la abrasión como resultado obtuvieron que cuando no se hace un cambio del material en más del 30% no se ponen en peligro las propiedades mecánicas del concreto. En los ensayos a compresión se presentó una variación de resistencia a la compresión versus el testigo la muestra del 30% de reemplazo del 3.7% mientras que en tensión fue del 5.2% y el módulo de elasticidad un 3.7% la relación agua cemento que trabajaron fue del 0.44; en el tema de la abrasión se obtuvieron mejores resultados que la muestra patrón en un 5.1%. Estos investigadores se han especializado en la revisión de diferentes características de estos agregados, es así como posteriormente Evangelista & de Brito (2010) decidieron revisar las propiedades de durabilidad mediante la elaboración de los ensayos de carbonatación y penetración de cloruros; donde se pudo observar que en el caso de la penetración de cloruro en la prueba varío linealmente aumentando hasta un 34% cuando se tenía un total reemplazo del agregado fino natural por el reciclado mientras que en la carbonatación el aumento fue de un 40% cuando se tenía un porcentaje de reemplazo del 30%, las conclusiones muestran que no se puede tener un reemplazo de la totalidad en concretos de uso estructural mientras que hasta el 30% en reemplazos es factible.

En parte el comportamiento del concreto depende de las características del agregado, las proporciones de mezclado y las condiciones de curado (Fonseca, De Brito, & Evangelista,

---

<sup>4</sup> ACR: Agregados provenientes de concreto reciclado

2011). En esta investigación evaluaron cuatro opciones de curado: curado bajo condiciones de laboratorio (LCC), curado al medio ambiente exterior (OEC), curado en cámara húmeda (CMI) y curado por inmersión en agua (WIC). Las variaciones en resistencia a la compresión en cualquiera de los tipos de curado no fueron significativas y se cree que es debido al pre humedecimiento de la arena reciclada antes de su utilización en la mezcla teniendo en cuenta la cantidad de agua que absorbe para no afectar la relación agua/cemento. Cuando se revisó la resistencia a la tracción se pudo observar que es más sensible al cambio de ambiente de curado en donde el de menor resultado fue OEC; en el módulo de elasticidad se vio un mejor comportamiento cuando se hizo el curado LCC, en las anteriores características a medida que se aumentaba el porcentaje de reemplazo del agregado hubo una disminución en comparación con el agregado natural; la única de las propiedades que mejoró a medida que se aumentó el reemplazo fue la resistencia a la abrasión la cual no presentó variación en ninguno de los procedimientos de curado.

Teniendo en cuenta que el manejo de estos concretos con adiciones de material reciclado tenía un menor comportamiento en la mayoría de propiedades que un concreto con agregados naturales Pereira, Evangelista, & De Brito (2012) revisaron la posibilidad de usar súper plastificantes en concretos elaborados con agregados reciclados variando la cantidad de porcentaje de los agregados y comparándolo contra un concreto convencional con agregado natural. Se concluyó que gracias al plastificante usado se podía bajar la relación agua/cemento y por lo tanto tener mejores resultados en las propiedades del concreto respecto al concreto tradicional. Complementando el anterior trabajo se volvió a revisar la alta absorción de agua que presentan estos agregados; Barbudo, De Brito, Evangelista, Bravo, & Agrela (2013) consignan en su trabajo que esto influye directamente en la trabajabilidad de las mezclas. Siendo así los autores plantearon la posibilidad de revisar el comportamiento de estas mezclas con el uso de plastificantes y cómo esto influiría en la calidad del concreto final. Como resultado de esta investigación pudieron aseverar que el uso de plastificantes en las mezclas reemplazando el 100 % de los agregados naturales por agregados reciclados utilizando plastificantes ofrece como resultado propiedades mecánicas similares a las obtenidas en una mezcla tradicional.

Otro de los aspectos importantes en el uso de agregados reciclados es conocer la procedencia de estos residuos; es así que Pedro, De Brito, & Evangelista (2014) realizaron

un trabajo donde utilizando los residuos provenientes de ensayos de laboratorio y conociendo el rango de resistencia se trató de replicar, con el resultado de trituración, concretos de la misma calidad que los originales. Para esto usaron tres rangos 15-25 MPa, 35-45 MPa y 65-75 MPa. En este caso se usó un porcentaje de reemplazo del 100% solo usando la materia prima descrita. Como resultado se obtuvo que en la mayoría de los rangos se encontraron menores valores en resistencias de los diferentes ensayos, otro de los aspectos importantes es la alta absorción de estos agregados reciclados y algunos con cambios fuertes en la contracción que se sugieren estudiar más a fondo.

Como el agregado fino ha demostrado que es un material de propiedades altamente variables, los investigadores Evangelista, Guedes, De Brito, Ferro, & Pereira (2015) revisaron las características físicas, químicas y mineralógicas de los agregados finos reciclados. Después de hacer la trituración mediante mandíbula se revisó el paso de los materiales por el tamiz donde se observó un mayor paso de finos, algunos de los materiales retenidos presentaban en gran parte material que poseía pasta de cemento con poco agregado natural; adicionalmente tenía fisuraciones revisadas al microscopio que podían ser el origen de una menor resistencia, también presenta una menor densidad debido a la microporosidad de la pasta antigua lo cual se traduce en mayor absorción de agua respecto al agregado natural. Este trabajo demuestra que los agregados finos naturales y reciclados tienen características y comportamiento muy diferentes que deben ser tenidos en cuenta en las aplicaciones donde se estudie su viabilidad.

Un trabajo realizado en Taiwán revisó los efectos que puede haber en el uso de agregados finos reciclados en el mortero; adicionalmente revisaron las diferencias de dos procesos de trituración; la primera triturando y produciendo agregados gruesos y finos al tiempo R1; y como segunda alternativa solo producir finos R2. Fan, Huang, Hwang, & Chao (2015) indican que R2 tiene menor porosidad, mayor densidad y absorción de agua más baja que R1, lo cual demuestra que el proceso de trituración puede influir también en la calidad del concreto reciclado; además se encontró que a medida que se aumentaba el porcentaje de reemplazo se encontraban disminuciones en los valores de las propiedades del material; la gran diferencia de este trabajo es que se tuvo en cuenta el proceso de obtención del



material fino lo cual tuvo varias ventajas sin embargo el costo de producción es elevado debido al mayor tiempo de producción de estos agregados finos.

## **2.3 Concreto reforzado con fibra de vidrio**

El GRC (del inglés Glassfibre Reinforced Cement) es un material compuesto de una matriz en mortero con cemento Portland y arena, reforzado con fibra resistente a los álcalis. El concreto reforzado con fibra de vidrio ha sido usado desde los años 70, gracias a las grandes posibilidades de diseño arquitectónico que puede ofrecer y sus grandes propiedades mecánicas, según lo indican Comino, Romero, & Saint Gobain Vetrotex (1996) en un panorama general en el que el uso de fibras de vidrio resistente a los álcalis demuestra que este compuesto es un material versátil que puede tener diversos usos en la parte arquitectónica y que con el debido estudio puede convertirse en una solución estructural. Teniendo en cuenta lo anterior los autores afirman que este material podrá ser indispensable para dar factibilidad a las grandes ideas del siglo XXI.

En el año 2007 los investigadores Ferreira & Branco (2007) elaboraron algunos experimentos para colocar a prueba las bondades del uso de fibra de vidrio; es importante aclarar que en estos ensayos se usó fibra resistente a álcalis con contenidos de circonio, debido a que en experiencias anteriores se pudo evidenciar que la fibra tenía una mala reacción con el cemento que ocasionaba una alta degradación en el tiempo trayendo como resultado que los elementos reforzados con fibra de vidrio presentaran deterioro rápidamente; adicionalmente a las fibras de vidrio se realizaron pruebas también con fibras de acero y carbono para tener puntos de comparación. Otro aspecto que se revisó fue la manera de producción para lo cual se consultaron aplicaciones realizadas por proyección y de la manera tradicional, que en este artículo se denominó premezclado (premix). Respecto a la manera de aplicación se pudo observar que la aplicación proyectada generaba concretos con mejores resistencias a tensión pero se tenían dificultades para elaborar elementos de mayor volumen; adicionalmente la elaboración de elementos con el tipo premezclado es la manera más común y de mayor accesibilidad actualmente lo que daba una ventaja respecto a la proyectada; la revisión de los resultados obtenidos en los ensayos fue de gran ayuda para poder realizar un modelo numérico de una torre de comunicaciones

que con la finalización de esta investigación pudo ser construida observándose que estas mezclas de GRC pueden tener aplicaciones estructurales y no solamente arquitectónicas.

Posteriormente Kim, Pilakoutas, & Waldron (2008) realizaron una investigación para evaluar la posibilidad de elaborar encofrados hechos en GRC los cuales fueran no recuperables. Para esto diseñaron elementos de muy poco espesor con nervaduras que además de tener refuerzo de fibra tenía barras de vidrio (FRP por siglas en inglés *Fiber Reinforced Polymer*). La idea de concebir estos elementos tenía como objetivo elaborar una formaleta que cubriera luces más grandes con poco espesor, para esta investigación se realizaron paneles elaborados por el proceso de proyección y se evaluaron estos elementos en tres etapas. La primera consistía en elaborar un elemento que lograra la máxima resistencia a la flexión con mínimo peso; la segunda trabajó en revisar la interacción entre FRP y GFRC; la tercera se ocupó de lograr un elemento de 3 m de longitud compuesta en GFRC y FRP. Como conclusión de este trabajo se pudo observar que estos elementos poseen una gran resistencia a la flexión, pero tienen grandes deflexiones sin embargo la resistencia obtenida del trabajo de ambos materiales (fibra vinculada en la mezcla y barras en el sentido longitudinal del elemento) muestran una gran eficiencia a la flexión.

Otro artículo relevante se refería al análisis de los efectos de la adición de microfibras de vidrio (6mm de longitud). Los autores Abdullah & Jallo (2011) afirman que, para adiciones de fibra de 600, 1000 y 1400 g/m<sup>3</sup> se obtuvieron mejoras en la resistencia a la compresión 3.6; 7.1; 9.3 %, en tracción indirecta 1,4; 3,1; 2.5 % y en el módulo de elasticidad 9.7; 56.6; 84 % respectivamente. Para esta investigación utilizaron dos clases de probetas la primera fueron cilindros de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura, para evaluar el concreto y para evaluar morteros cubos de 100 mm de lado. Esta investigación nos da un indicio de las mejoras en las propiedades del concreto cuando se usan fibras cortas.

Entrando en el tema de utilizar concreto reforzado con fibra de vidrio pero adicionándole otros materiales los autores Sujivorakul, Jaturapitakkul, & Taotip (2011) realizaron un trabajo en el cual se vincularon a la mezcla dos tipos de cenizas (ceniza de cascarilla de arroz RHA y ceniza de combustible de aceite de palma POFA), para realizar reemplazos de contenido de cemento en porcentajes de 10%, 20% 30% y 40%. Todas las mezclas tuvieron

un contenido de fibra del 5% y se revisaron resultados a los 7, 28 y 56 días de edad; como conclusión de este trabajo se presentó que para no tener afectaciones de las propiedades físicas del material se podría reemplazar hasta un 20% por cenizas RHA o POFA; esto con el fin de reducir costos de producción y adicionalmente tendría un beneficio en reducción de las emisiones de CO<sup>2</sup> al ambiente.

Dentro de las investigaciones recientes con el GRC vinculando otros materiales, se encontró una referencia, donde se utilizó material proveniente del reciclado de llantas, con el fin de usarlas en paneles para reducción de ruido. Pastor, García, Quintana, & Peña, (2014) sustituyeron parte de arena por el material reciclado logrando un beneficio ambiental. Al agregar este material a los paneles tuvieron reducción de las propiedades mecánicas, pero al revisar los beneficios acústicos se pudo observar que la absorción de ruido fue del 40% al 50% en altas frecuencias, lo que significa que se podría dar uso a este tipo de paneles en barreras de seguridad para disminuir el ruido del tráfico.

Teniendo en cuenta las investigaciones anteriores donde se ha utilizado el agregado reciclado en concretos convencionales y la fibra de vidrio como elemento mejorador de las propiedades mecánicas de concretos, se plantea la elaboración de un proyecto experimental en el cual se vinculen agregados finos de concreto reciclado variando el contenido en mezclas tipo GRC, manteniendo una relación A/C de 0.4 según lo recomendado en documentos como el de Comino et al.(1996). Se utilizarán plastificantes de alto rango, manteniendo un ambiente de curado de 7 días sumergidos en agua, con el fin de simular las condiciones reales de curado en obra y los siguientes días bajo sombra. La inclusión de fibra corta en la mezcla será fija de 3.5%, este proyecto tiene la misión el generar un uso adicional a los materiales reciclados utilizándolos dentro de mezclas tipo GRC las cuales tienen una gran versatilidad y pueden generar una producción de elementos livianos y resistentes para ser usados en áreas tales como el urbanismo y las fachadas.

Ya que la aplicación de este estudio será una plaqueta tipo deck es importante mencionar la investigación de Arango (2006) donde se realizó la caracterización físico mecánica de varios adoquines en concreto producidos en Colombia, del cual se concluyó que el máximo valor tolerado al desgaste para los adoquines es de 23mm el cual se deberá obtener del promedio más la mitad de la desviación estándar.



### 3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Como primera medida se realizó la consulta de los elementos de protección y medidas de precaución para tener en cuenta en el manejo de las fibras de vidrio y la arena de sílice. Basado en la búsqueda se elaboró el anexo A donde se encuentran reunidas las recomendaciones dadas por el fabricante de la fibra (Owens Corning, 2010) y la organización de Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (U.S. Department of Labor & Occupational Safety and Health Administration, 2003).

El programa experimental se diseñó para ser ejecutado en las instalaciones del laboratorio de materiales y estructuras de la Escuela Colombiana de Ingeniería “Julio Garavito”. Se elaboraron 7 tipos diferentes de mezclas de mortero, en donde en 5 de ellas se variaba el contenido de material reciclado dentro de la mezcla y las otras dos tenían solo un tipo de agregado. En la Tabla 3-1 se pueden observar la nomenclatura utilizada y las relaciones de mezcla utilizadas.

**Tabla 3-1** Tipos de mezcla y nomenclatura utilizada

<b>MUESTRAS</b>	<b>50% en la mezcla</b>		<b>CEMENTO</b>	<b>ADITIVO</b>	<b>FIBRA DE VIDRIO</b>
	<b>ARENA DE SILICE</b>	<b>ARENA RECICLADA</b>			
	<b>% de agregado fino</b>	<b>% de agregado fino</b>	<b>% en la mezcla</b>	<b>kg por m3</b>	<b>% por m3 de mezcla</b>
<i>M1</i>	100%		50%	1.1	
<i>M2</i>	100%		50%	1.1	3%
<i>M3</i>	75%	25%	50%	1.1	3%
<i>M4</i>	50%	50%	50%	1.1	3%
<i>M5</i>	25%	75%	50%	1.1	3%

M6		100%	50%	1.1	3%
M7		100%	50%	1.1	

Debido a que este mortero tiene como referencia el GRC las relaciones arena y material cementante utilizadas en este tipo de mezclas es 1:1, la relación agua / cemento en esta investigación se trabajó con una relación de 0.4. Es importante aclarar que como se trabajaba con material reciclado se debió saturar la arena un día antes (24 horas) a la utilización en las mezclas, la cantidad de agua absorbida en el proceso fue tomada en cuenta para reducir el agua aplicada y así lograr mantener la relación agua/cemento. Se realizaron ensayos y mediciones de estos elementos a las edades 4, 35 y 90 días, el curado de las probetas se hizo en completa inmersión durante 7 días, posterior a este tiempo se colocaron bajo la sombra hasta el día de ensayo.

### 3.1 Caracterización de los materiales de las mezclas

En esta investigación se utilizaron los siguientes materiales:

#### 3.1.1 Arena reciclada

Esta arena fue adquirida en una planta de trituración que comercializa este material en las afueras de Bogotá sobre la autopista Medellín vía a Cota. A continuación se encuentra la caracterización realizada en el Laboratorio de Suelos de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

#### Densidad y absorción: Norma INV- E 222-13

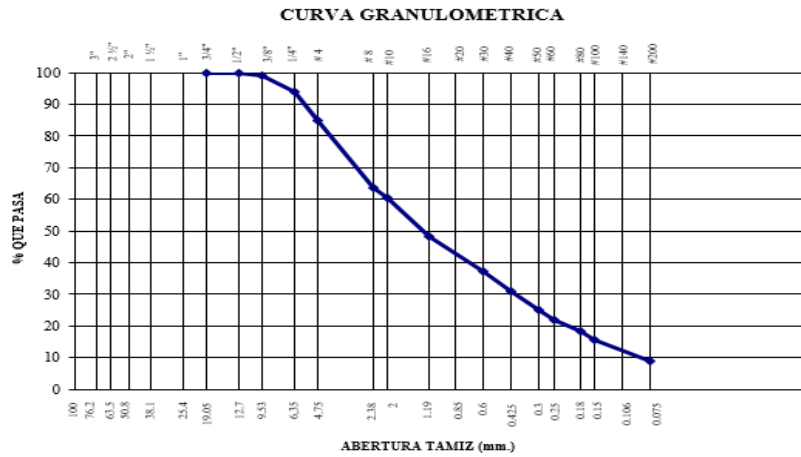
Densidad Relativa Secada al Horno	2.24 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Relativa en Condición SSS	2.38 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Relativa Aparente	2.59 g/cm <sup>3</sup>
Absorción	5.9%

**Contenido de materia orgánica Norma INV E 212 -13**

Coloración no. 2

**Granulometría Norma INV E 213 -13**

**Figura 2** Curva granulométrica arena reciclada



**3.1.2 Arena de sílice**

La arena de sílice es proveniente de una mina en el departamento de Boyacá y adquirido en una comercializadora de este material en la zona de Fontibón, los siguientes datos fueron suministrados por el proveedor Arena Sílicea & Arquitectos SAS.

**Figura 3** Curva Granulométrica arena de sílice



Descripción del material: Arena gruesa a media de color amarillo pálido y gris claro, redondeada a sub redondeada.

Diámetro efectivo: 1.22mm

### 3.1.3 Cemento

El cemento usado es tipo estructural suministrado por la empresa ARGOS, este cemento generalmente es utilizado en la elaboración de prefabricados, en la Tabla 3-2 se encuentra su caracterización físico química

**Tabla 3-2** Caracterización físico química del cemento utilizado

<b>Características del Cemento</b>	
<b>Composición química (%)</b>	
SiO <sub>2</sub>	20,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,12
CaO	62,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,59
MgO	1,40
K <sub>2</sub> O	0,39
<b>Propiedades Físicas</b>	
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3,10
Finura (cm <sup>2</sup> /g)	4350
Tamaño promedio de Partícula (µm)	19,85

### 3.1.4 Fibra de vidrio

La fibra usada es del tipo hilos cortados para la mezcla en morteros y concretos hidráulicos; esta fibra tiene tratamiento con circonio lo que la hace resistente a la alcalinidad del cemento. Se encuentra diseñada para realizar refuerzo como microfibra y de fácil incorporación dentro de la mezcla sin afectar el acabado del concreto. A continuación, se encuentran las características del producto utilizado, datos recolectados de la ficha técnica según Owens Corning (2010):

- Longitud de la fibra: 12mm



- Diámetro del filamento: 14 ( $\mu\text{m}$ ), 0,000546 (pulg.)
- Pérdida al fuego %: 0,55% (ISO 1980: 1980)
- Humedad: 0,3% máx. (ISO 3344: 1977)
- Material: Vidrio resistente a los álcalis<sup>5</sup>
- Peso específico: 2,68 g/cm<sup>3</sup>
- Punto de ablandamiento: 860°C - 1580°F
- Conductividad eléctrica: Muy baja
- Resistencia química: Muy alta
- Módulo de elasticidad: 72GPa -  $10 \times 10^6$  psi
- Resistencia a la tracción: 1.700 MPa -  $250 \times 10^3$  psi

## 3.2 Elaboración de mezclas para ensayos

Teniendo como base las mezclas mortero indicadas en la Tabla 3-1, y de acuerdo con la cantidad de ensayos a realizar, se determinó la cantidad de moldes. Para cada una de las 7 mezclas se elaboraron:

- 19 cilindros de 100 mm de diámetro x 200 mm de altura, para los ensayos de compresión, módulo de elasticidad, velocidad de pulso, ISAT, porosidad, sortividad, abrasión, sulfatos;
- 3 vigas para flexión
- 4 viguetas para mediciones de contracción y exposición a sulfatos.

El proceso de elaboración de muestras, se efectuó durante 3 días seguidos teniendo en cuenta la disponibilidad de moldes en el laboratorio. Como se observa en la Figura 4 se

---

<sup>5</sup> Fibras fabricadas con un alto contenido en circonio que cumple con las normas ASTM C1666/C1666/M-07, EN 15422 y las recomendaciones del PCI y de la GRCA.

realizó la preparación de moldes para fundir 2 mezclas por día y en uno de los tres días se elaboraron 3 mezclas logrando así completar las 7 mezclas en 3 días.

**Figura 4** Preparación de formaletas para fundida



A cada una de las mezclas se le realizaron los siguientes ensayos en estado fresco: masa unitaria, temperatura y asentamiento, como se observa en la Figura 5.

**Figura 5** Ensayos en estado fresco de las mezclas



### 3.3 Nomenclatura de probetas utilizada

El día siguiente a la fundida se procedió al desencofrado y rotulado de las probetas para lo cual se trabajó con la siguiente nomenclatura:

Por ejemplo: F1 M1 A ver Tabla 3-3

**Tabla 3-3** Nomenclatura de probetas

F1	M1	A
F1: Fundida día 1 ( 2 de Marzo)	Tipo de mezcla según Tabla 3-1	Nomenclatura alfabética según sea el tipo de probeta
F2: Fundida día 2 (3 de Marzo)		
F3: Fundida día 3 (4 de Marzo)		

La nomenclatura alfabética por muestra está relacionada con el tipo de probeta y en que ensayo se utilizará; por ejemplo, en los cilindros 100mm x 200mm se manejó así:

**Tabla 3-4** Nomenclatura alfabética probetas cilíndricas

<b>ENSAYO</b>	<b>NOMBRE ALFABETICO</b>
Compresión, ISAT, Velocidad de pulso	A, B, C, D, E, F, G, H, I
Porosidad	J, K
Sortividad	L, M
Sulfatos	N. Ñ
Abrasión	O

### 3.4 Ambiente de curado

Las probetas luego de ser desencofradas se llevaron a la piscina durante 7 días posteriormente se sacaron de la piscina y se ubicaron en un sitio de almacenamiento, protegido de la lluvia, el sol y otras condiciones ambientes desfavorables hasta que les correspondiera el día de ensayo todo esto el fin de simular el ambiente de curado que se usaría en la planta de prefabricación. Las viguetas de contracción fueron colocadas en el

cuarto de humedad y temperatura controladas para iniciar con las lecturas de contracción, el mismo día del desencofrado; las muestras que se iban a utilizar para el ensayo de sulfatos se dejaron los 7 días en la piscina y se ubicaron en un sitio de almacenamiento, protegido de la lluvia, el sol y otras condiciones ambientales desfavorables, hasta el día 28 en el cual se sumergieron en el ambiente agresivo de sulfatos de acuerdo al procedimiento explicado en la sección 3.6.7.

### **3.5 Edades de ensayo**

Las edades seleccionadas en los ensayos fueron 3, 35 y 90 días. En el ensayo de sulfatos se utilizó la edad más cercana a la entrega del documento para revisar a mayor plazo el comportamiento final.

## **3.6 Ensayos realizados a las probetas**

### **3.6.1 Ensayo de medición de la tasa de absorción inicial ISAT**

Se siguieron los parámetros que dicta la Norma Británica BS 1881 parte 208, éste ensayo indica la cantidad de agua que absorbe el cilindro de concreto por su cara superior en un tiempo determinado.

La lectura se realiza mediante un capilar de vidrio que se encuentra conectado con una manguera a un dispositivo acrílico que mantiene el agua en su interior gracias a un caucho lubricado con vaselina en un área controlada como se observa en la Figura 6; se registran las unidades calibradas de los capilares con el fin de calcular el coeficiente de permeabilidad (K) este resultado se compara contra una tabla para revisar el grado de absorción que tenemos para el tipo de material evaluado. Para este ensayo los cilindros tuvieron que ser preparados mediante una copa de pulido para lograr un buen sello de la base acrílica y evitar que el agua se escapara obteniendo una lectura errónea.

**Figura 6** Montaje de ensayo ISAT

### 3.6.2 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico

Este ensayo tuvo como guía la norma NTC 4325 (Método de ensayo para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico a través del concreto) (ICONTEC, 1997b) y se aplicó a cilindros de dimensiones 100mm de diámetro por 200mm de altura. Este ensayo se realizó a los cilindros luego de realizar el ISAT para después realizar el ensayo a compresión y módulo de elasticidad, en este ensayo se mide la velocidad que tarda el pulso en recorrer la altura del cilindro desde un transductor emisor al receptor, se obtienen tres datos y luego se promedian para tener un dato. En este caso se usó la metodología de medición directa ya que los transductores se encontraban a ambos extremos del cilindro como se observa en la Figura 7.

**Figura 7** Toma de datos ensayo velocidad de pulso ultrasónico

### **3.6.3 Ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad.**

Para la realización de este ensayo se siguieron los parámetros establecidos por la norma NTC 673- ASTM C39 (Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto)(ICONTEC, 2010), y la NTC 4025 - ASTM-C469 (Método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson en concreto a compresión)(ICONTEC, 2010). Se usó la misma probeta para la realización de los dos ensayos en donde se utilizaron cilindros de 100mm de diámetro por 200mm de altura, los cuales fueron ensayados con los suplementos de neopreno en su mayoría para no usar el capinado mediante azufre. Se utilizó la prensa de 200 toneladas, las lecturas tomadas se realizaron cada 2000 kg y para medir las deformaciones axiales, se utilizó un deformímetro

de precisión de centésimas de milímetro como se observa en la Figura 8; se realizaron ensayos a tres edades 3, 35 y 90 días y por cada ensayo se utilizaron 3 cilindros.

**Figura 8** Montaje de cilindro con deformímetro para ensayo de módulo de elasticidad y resistencia a la compresión



### 3.6.4 Ensayo de sortividad

Para el ensayo de sortividad se usaron rodajas extraídas de los cilindros de 100 mm x 200mm con una altura cercana a los 50mm de donde se extraían 3 rodajas, la rodaja superior que contenía la cara expuesta en la fundida fue la seleccionada para el ensayo de sortividad las otras se usaron para el ensayo de porosidad y absorción; la rodaja debía ser preparada mediante el sellado del perímetro y cubriendo la cara cortada con un guante de cirugía para evitar que entrara humedad por esta cara como se observa en la Figura 9; las rodajas debían dejarse un día en el desecador con el objetivo de absorber la mayor cantidad de humedad de las muestras a sus respectivas edades. Este ensayo mide en varios lapsos de tiempo cuánta agua absorbe la probeta, mediante el registro de variación de la masa. La norma que da los parámetros a este ensayo es la ASTM C 1585 (Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes)(American Society for Testing Materials, 2004).

**Figura 9** Muestras en ensayo de sortividad

### **3.6.5 Ensayo de absorción, densidad y volumen de poros permeables**

Para este ensayo se usaron las rodajas intermedias de los cilindros en los cuales se procedió de acuerdo a lo estipulado en la norma NTC 5653 - ASTM C642 (Determinación de la gravedad específica, absorción y vacíos en el concreto endurecido)(ASTM International, 1997). El procedimiento realizado fue el de colocar las rodajas en un horno durante 24 horas para poder obtener el peso, posterior a este procedimiento se sumerge en agua durante 48 horas y se vuelven a pesar, al obtener esta medición las rodajas se introducen en agua de nuevo para colocarlas hasta punto de ebullición del agua durante 5 horas, cuando bajan a la temperatura de 20° C se vuelven a pesar para obtener un tercer dato de medición; para finalizar el proceso se realiza una medición del peso sumergido. Esta medida es de vital importancia para poder determinar el grado de porosidad que puede influir en la calidad del material y de cómo puede reaccionar frente a la agresividad cuando este expuesta a la intemperie.



### 3.6.6 Ensayo a la flexión

Para este ensayo se siguió el procedimiento indicado por la NTC 2871 - ASTM C78 (Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión)(ICONTEC, 1997a) en este caso se utilizaron las vigas de sección transversal de 150 mm y 500 mm de longitud; por cada tipo de mezcla se elaboraron dos vigas que fueron ensayadas a los 35 días aproximadamente. Las vigas se apoyaron en la parte inferior a los extremos y en la parte superior se utilizó un par de apoyos ubicados a los tercios medios, de modo que produjeran la falla por flexión pura como se ilustra en la Figura 10.

**Figura 10** Ensayo de viga a flexión



### 3.6.7 Ensayo resistencia a sulfatos

En este caso se utilizó como guía para la elaboración del ensayo la norma NTC 3330 - ASTM C1012 (Método de ensayo para determinar el cambio longitudinal de morteros de cemento hidráulico expuestos a una solución de sulfatos)(ASTM International, 2015) se usó el sulfato de magnesio de acuerdo a las investigaciones realizadas por Garzón (2013) donde se encontró que este agente químico afecta directamente el aluminato tricálcico presente en el cemento haciéndolo el más perjudicial dentro de los sulfatos. Para preparar la solución (50 gr de Sulfato de magnesio, 900ml de agua el restante para completar un litro

fue agua destilada) en la cual se introdujeron las probetas, en este caso se dejaron en un tambor plástico en el cual se colocó la solución como lo indica la norma teniendo en cuenta la relación de volúmenes de concreto para determinar la cantidad de solución a utilizar, en este ensayo se usaron dos tipos de probetas los cilindros de concreto de 100mm x 200mm a los cuales se les tomaron medidas iniciales antes de introducirlas y como otra medida de control a la expansión que se produjo se usaron las viguetas para medición de contracciones. Estos elementos fueron dejados en el tambor cerrado y se tomaron medidas para revisar cómo se iban comportando, al finalizar el ensayo se fallaron los cilindros para hacer una comparación contra los cilindros sometidos a curado normal y revisar la diferencia en la resistencia.

**Figura 11** Tanque con solución de sulfatos para inmersión de probetas



### 3.6.8 Ensayo contracción

Este ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM C157(Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete) (Astm C 490, 2011); para éste caso se elaboraron viguetas las cuales tenían unas dimensiones de 50mm x 50mm en sección transversal x 250mm de longitud; las viguetas luego de 24 horas de moldeadas, se desencofraron y se llevaron al cuarto de humedad y temperatura controlada; los registros de variación de longitud se tomaron diariamente y posteriormente se varió el tiempo de

lecturas hasta cuando no se presentarán grandes diferencias. En la Figura 12 se observa el montaje para la medición de las probetas.

**Figura 12** Comparador digital con vigueta en medición



### 3.6.9 Ensayo abrasión por chorro de arena

En este caso se usaron rodajas resultantes de los cilindros cortados para los ensayos de ISAT y porosidad, se tuvo que realizar un pequeño molde en madera para el sostenimiento de estos elementos al equipo de ensayo de abrasión como se observa en la Figura 13, para este caso la norma NTC 5147(Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión de materiales para pisos y pavimentos, mediante arena y disco metálico ancho)(ICONTEC, 2002) da los parámetros para la ejecución de este ensayo. Se ensayaron 3 probetas por mezcla para determinar la resistencia de la mezcla a la abrasión con el objetivo de escoger una para la realización de plaquetas tipo deck o elementos de urbanismo.

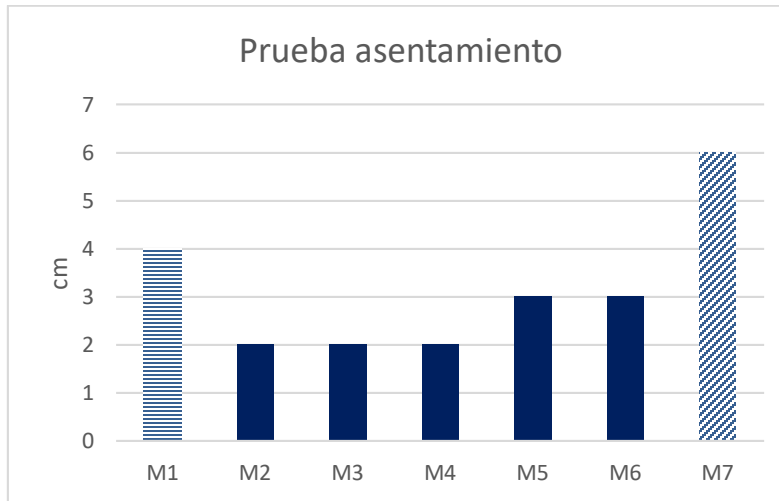
**Figura 13** Montaje en equipo de ensayo abrasión chorro de arena y rueda metálica



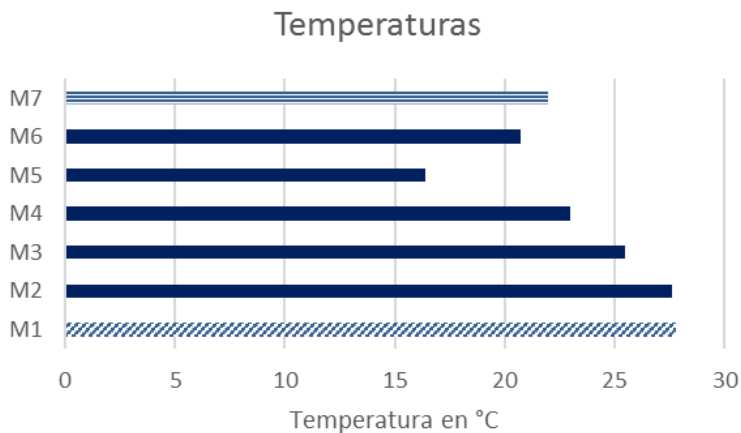
## **4 RESULTADOS Y ANALISIS**

### **4.1 Propiedades en estado fresco**

En el ensayo de asentamiento como se observa en la Figura 14, se obtuvieron los mayores resultados en las mezclas sin fibra (M1 y M7), en siguiente posición se encontraron las mezclas 75% ACR con fibra (M5) y 100% ACR con fibra (M6). Las mezclas M5 y M6 a pesar de contener fibra junto con un mayor contenido de arena reciclada generaron un mayor asentamiento y una mejor manejabilidad al momento de realizar la fundición de las probetas; es probable que debido al proceso de trituración el agregado tenía una gradación menos constante (más diversidad de tamaños) respecto a la arena de sílice. La arena reciclada utilizada en cada mezcla se sometió a un pretratamiento de saturación efectuado 24 horas de su utilización, para evitar que estas mezclas tuviesen mayor contenido de agua que las mezclas sin arena reciclada se hizo una correlación para reducir el agua de mezclado obteniendo en la mayoría de mediciones una reducción de agua para las mezclas pre saturadas del 18% en peso.

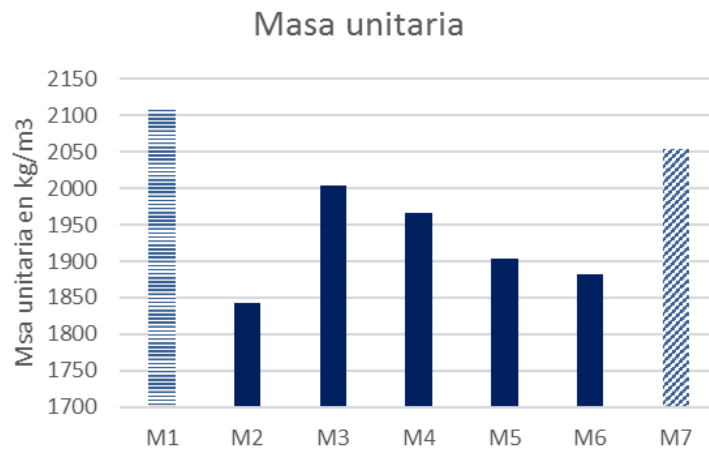
**Figura 14** Asentamiento de mezclas

Para la temperatura en estado fresco como se observa en la Figura 15 la mezcla 100% arena sílice sin fibra (M1) tuvo la mayor temperatura y en caso contrario la mezcla 75% ACR con fibra (M5) tuvo la menor; esta característica puede estar influida por el contenido de agregado pre saturado, realizando la comparación con las mezclas de mayor contenido de arena de sílice hubo una variación aproximada de 5° C, es necesario aclarar que los materiales al momento de la fundición siempre estuvieron a la sombra para evitar que el clima afectara su temperatura, durante los 3 días de fundición el clima estuvo en temperatura ambiente en un rango de 15°C a 18°C durante las horas del mezclado.

**Figura 15** Temperaturas de mezcla en estado fresco

La masa unitaria en estado fresco tuvo diferencias, donde se acentuó que las mezclas que no tenían fibras obtuvieron las mayores masas; en las mezclas que contenían fibra la mezcla 25% ACR (M3) obtuvo la mayor masa como se observa en la Figura 16. Esta reducción de la masa se observa debido a que las mezclas con fibra tuvieron mayor porosidad (todas las mezclas tuvieron el mismo método de compactación según fuera la forma de la formaleta de la probeta) como se observó en las probetas al momento del desencofrado. También se puede determinar que el contenido es aire ya que las fibras tienen una masa unitaria de  $2680 \text{ kg/m}^3$  dato que manifiesta que con un adecuado vibrado la mezcla debería ser más densa que un concreto sin fibra.

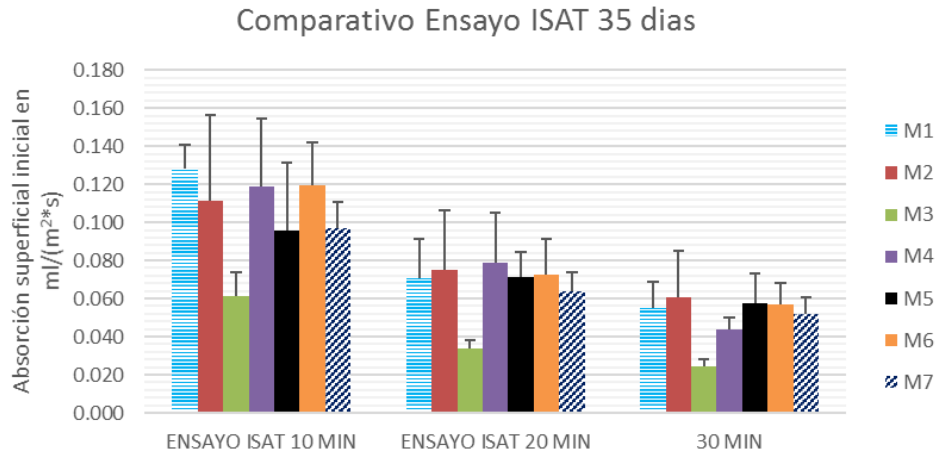
**Figura 16** Masa unitaria en estado fresco



## 4.2 Propiedades en estado endurecido

### 4.2.1 Tasa de absorción inicial ISAT

En general estos morteros tuvieron una tasa de absorción inicial baja, se tuvieron en cuenta medidas a dos edades 35 y 90 días; y 3 tiempos de registros, 10 minutos, 20 minutos y 30 minutos. A continuación, se presenta la Figura 17 y la Figura 18 donde se grafica el promedio por mezcla en los diferentes tiempos de lectura y en las dos edades.

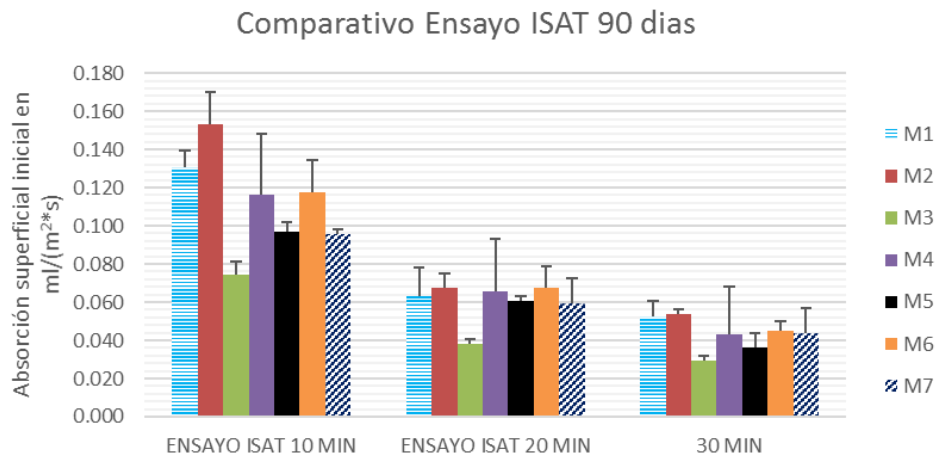
**Figura 17** ISAT comparativo del promedio por mezcla a la edad de 35 días

La mezcla 25% ACR con fibra (M3) fue la que menos agua absorbió en los tres tiempos tomados teniendo una absorción de casi la mitad comparada con la 50% arena sílice con fibra (M4); también se observa que la mayor variación entre los cilindros de una misma mezcla fue de un 30% la cual se redujo cuando se revisaban las medidas a los 20 minutos y 30 minutos. De acuerdo con lo esperado, se observa una disminución de la absorción a medida que transcurre el tiempo, manifestando que la superficie del cilindro en su primer momento se encuentra totalmente seca y se van saturando los poros, es importante aclarar que estos cilindros tuvieron un curado de solo 7 días y que a partir de ese momento estos fueron sacados de la piscina de curado y dejados en la sombra así que en el momento de realizar este ensayo solo presentaba la humedad del ambiente, en este primer lapso absorbía casi el doble de agua que en el tiempo de 20 minutos.

Las mezclas que no contenían fibra es decir la M1 y M7, entre ellas se puede revisar que la que tenía el 100% de material reciclado (M7) en todos los tiempos de medición la absorción siempre fue menor respecto a la 100% arena sílice (M1), aspecto importante que puede ser contrario a lo reportado por Evangelista et al.(2015) en su estudio, donde manifestaban que debido al proceso de trituración varias partículas tienen adheridas pasta de cemento antigua que puede ocasionar una densidad menor que un agregado fino y por ende necesitar más agua.



**Figura 18** ISAT comparativo del promedio por mezcla a la edad de 90 días



A diferencia de las mediciones a la edad de 35 días la mezcla que tuvo una mayor absorción fue la 100% arena sílice con fibra (M2) como se observa en la Figura 18 adicionalmente se observa que se conservó la tendencia que en el segundo tiempo de medición los cilindros tuvieron la mitad de absorción. La mezcla 25% ACR con fibra (M3) se mantuvo con la menor absorción entre las diferentes mezclas y la desviación en las mediciones fue inferior en esta edad. Teniendo en cuenta la Tabla 4-1 se puede decir que las mezclas en general tuvieron una absorción baja ya que todas estuvieron por debajo del límite de 0.25 a los 10 minutos y de 0.17 a los 30 minutos.

Tabla 4-1 Clasificación de la absorción capilar según valor de ISAT (ml/m<sup>2</sup>.s)(Torres, 2014)

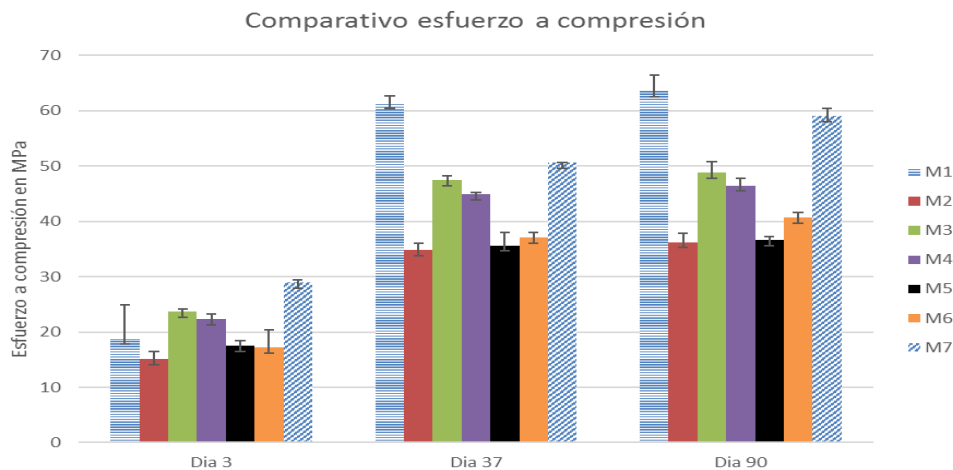
Absorción del concreto	Tiempo desde el inicio del ensayo			
	10 min	30 min	1 hora	2 horas
Alta	> 0,50	> 0.35	> 0.20	> 0.15
Media	0,25 - 0,50	0.17 - 0.35	0.10 - 0.20	0.07 - 0.15
Baja	< 0,25	< 0.17	< 0.10	< 0.07

## 4.2.2 Resistencia a compresión

Como resultado de este ensayo la Figura 22 muestra que la mezclas con mayor resistencia a la compresión en un 43% fueron las que no tenían fibras siendo acorde con la mayor masa unitaria y la menor porosidad.

La mezcla 25% ACR con fibra (M3) fue la más destacada entre las mezclas que tenían fibras siendo superior a la 50% ACR (M4) un 6% aproximadamente en las diferentes edades. En comparación a las mezclas M2, M5 y M6 a los 3 días de edad obtuvo un 46% de aumento; para las edades 37 y 90 días este aumento fue de 33% y 27% respectivamente.

**Figura 19** Comparativo de resistencia a compresión.



Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para las mezclas que tenían vinculada fibra estos son coherentes con la investigación de Fonseca et al. (2011) en la que hasta un 30% de vinculación de material reciclado se obtenían resultados mecánicos similares a mezclas con la totalidad de material natural. Es importante resaltar que como en este caso la granulometría utilizada en la arena de sílice era cercana a 1 mm pudo generarse una buena gradación al vincular la arena reciclada siendo un complemento de mejora en la granulometría general de la mezcla.

En los resultados obtenidos también se pudo encontrar que la mayoría de mezclas estuvieron dentro de los rangos propuestos por Comino et al. (1996) los cuales indicaban

que para mezclas con fibra de vidrio premezclada las resistencias a compresión variaban dentro de un rango de resistencia de 40 – 60 MPa para relaciones A/C entre 0.3 y 0.4.

**Figura 20** Diferencia de falla cilindros, Cilindro sin fibra (izq.), Cilindro con fibra (der)



En la Figura 20 se observa una de las características que diferenciaron en el momento del ensayo el cual fue la falla explosiva que se presentó en las probetas de las mezclas M1 y M7 comparada contra la falla en los cilindros con fibra que siempre mantuvo la forma y no presentó desprendimientos de material en el momento de la falla. En todos los cilindros ensayados y en todas las edades cuando se realizó este ensayo se produjo el cono de falla por compresión como se observa en la Figura 21.

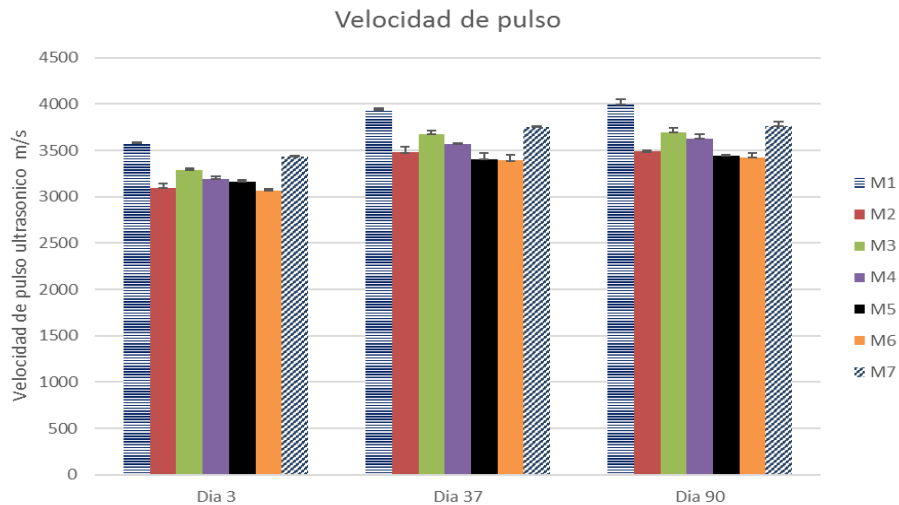
**Figura 21** Cono de falla por compresión



### 4.2.3 Velocidad de pulso ultrasónico VPU

Los cilindros a los cuales se les hizo la medición de VPU fueron los mismos que se ensayaron posteriormente a compresión. Observando la Figura 22 se puede ver que las velocidades aumentaron de acuerdo como lo hizo la resistencia a compresión, se conservó la tendencia de las mezclas M1 y M7; entre estas dos también se mantuvo la diferencia siendo la M1 mayor que la M7 este comportamiento se debe a la vinculación del agregado reciclado siendo igual a lo observado en el estudio de Bojacà & Torres (2013) donde en las mezclas a medida que aumentaba el contenido de ACR la VPU disminuía. Dentro de las mezclas con fibra la 25% ACR (M3) fue la mayor en velocidades conservando su tercera posición entre las mayores resistencias a compresión.

**Figura 22** Comparativo de velocidades de pulso ultrasónico



Al compararlo con estudios como los de Bojacà & Torres (2013) y Laverde (2014) en los cuales se realizaron mediciones de VPU aclarando que para el caso de ellos eran concretos adicionados con ACR se pudo encontrar que estas velocidades fueron similares pero la gran diferencia es que las resistencias a compresión eran cercanas a los 30 MPa en estas investigaciones. Teniendo en cuenta lo anterior se podría concluir que la VPU tiene que ser relacionada con la clase de material usado ya que como se observó la resistencia en este estudio debido a la dosificación de cemento era mucho mayor pero las velocidades fueron similares.

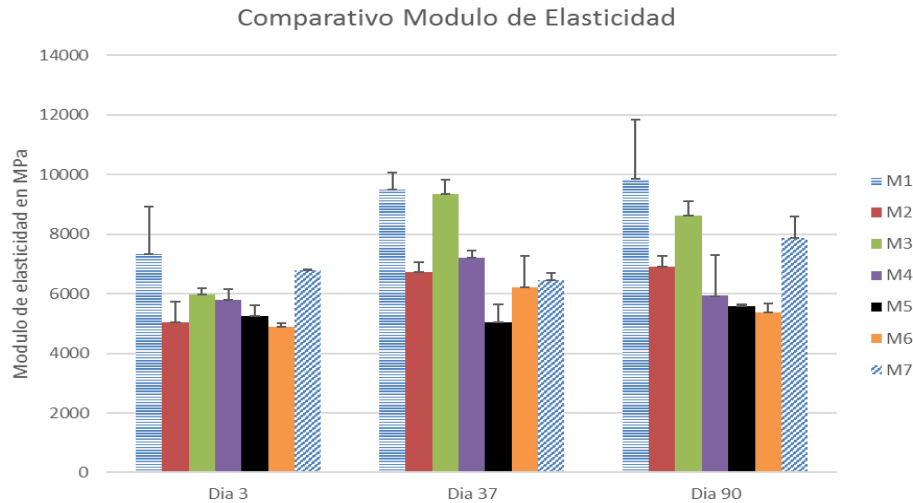
**Tabla 4-2** Clasificación del concreto de acuerdo con los valores de velocidad de pulso ultrasónico (Torres, 2014)

<b>Velocidad ultrasónica V (m/s)</b>	<b>Clasificación del concreto</b>
$V > 4575$	Excelente
$3660 < V < 4575$	Bueno
$3050 < V < 3660$	Cuestionable
$2135 < V < 3050$	Pobre
$V < 2135$	Muy pobre

Comparando los datos obtenidos con la Tabla 4-2 obtenida del estudio realizado por Bojacà (2013) los datos obtenidos estarían en los rangos cuestionable y bueno, sin embargo, es necesario aclarar que la tabla está orientada al concreto, pero se tomó esta tabla como base para realizar el comparativo.

#### 4.2.4 Módulo de elasticidad

Analizando la Figura 23 se observa que el mayor módulo de elasticidad lo tuvo la mezcla que contenía 100% de arena de sílice y sin fibra (M1). La mezcla de mejor comportamiento de las que tenían fibra fue la M3 la cual tenía un contenido del 25% de ACR fino, el módulo elástico promedio de esta mezcla fue cercano a los 9000 MPa. Es importante resaltar que las mezclas que tenían fibra toleraron más deformación elástica lo cual puede ser de gran ayuda en la fabricación de elementos que sean sometidos a manipulación o transporte como es el caso de los prefabricados.

**Figura 23** Comparativo de módulo de elasticidad

En comparación con la investigación sobre concretos vinculando ACR de Laverde (2014) en la cual los módulos son cercanos a los 20000 MPa las mezclas M1 a M7 estuvieron entre 6000 y 10000 MPa mostrando que las mezclas tienen mayores deformaciones para esfuerzos similares, esto demuestra un grado de rigidez mayor en las mezclas de concreto versus los morteros con ACR.

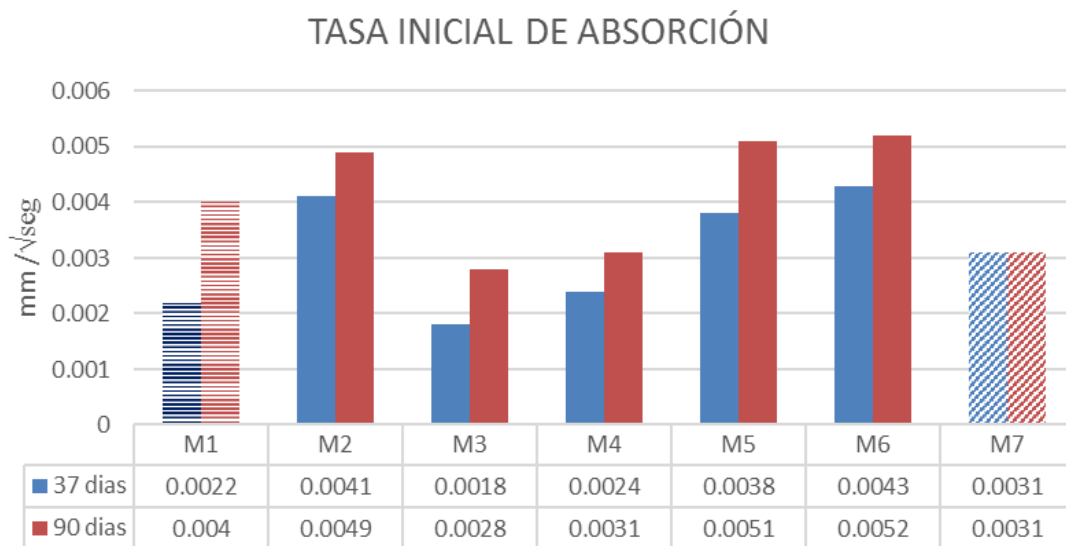
Según los datos obtenidos para el ensayo de módulo de elasticidad versus los datos suministrados en el artículo de Comino et al. (1996) se puede observar que se estuvo por debajo del rango que especifican de 10000 a 20000 MPa y también por debajo del rango que muestra el artículo de Ferreira & Branco (2007) de 10000 a 14000 MPa. Demostrando que las mezclas de esta investigación son menos rígidas teniendo en cuenta que los datos de las dos investigaciones son parámetros basados en mezclas y procedimiento de mezclado similar pero sin vinculación de material ACR.

#### 4.2.5 Sortividad

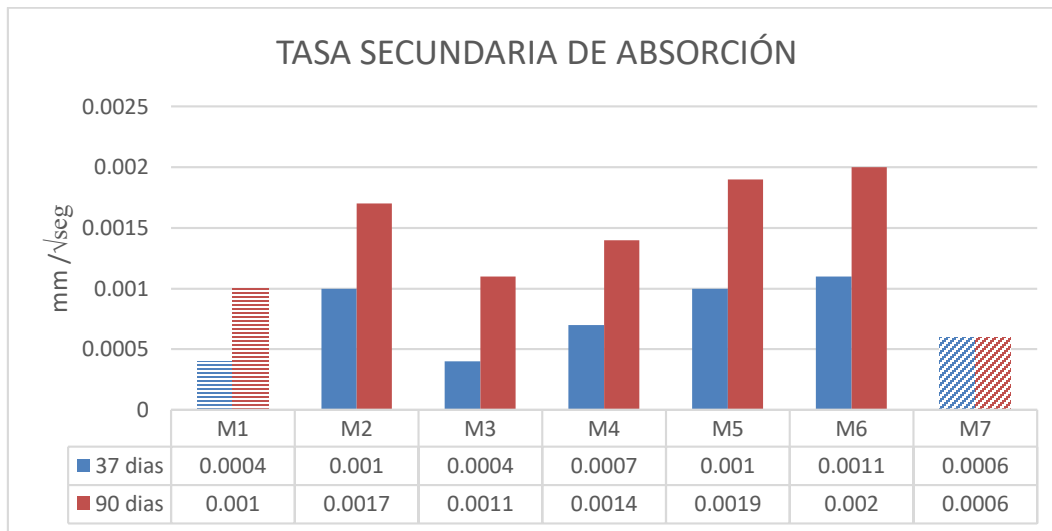
En esta prueba se realizaron mediciones de las probetas a 37 días y 90 días. Durante la elaboración de este ensayo se utilizaron las mismas unidades a ambas edades, es decir que la misma probeta se midió a 37 días posteriormente se dejó al ambiente y se preparó antes de los 90 días para volverse a utilizar en la siguiente medición, dado que el ensayo

realizado no genera alteraciones en la muestra de ensayo. Como se observa en la Figura 24 se encuentra un incremento de absorción a los 90 días respecto a la edad de 37 días la mezcla que refleja una menor tasa inicial de absorción en ambas edades fue la 25% ACR con fibra (M3) y la mezcla que tuvo el mayor incremento entre ambas edades fue la 100% arena sílice sin fibra (M1).

**Figura 24** Comparativo tasa inicial de absorción



A diferencia con las investigaciones realizadas con agregados de concreto reciclado por se encuentra que los valores de la tasa inicial que ellos obtuvieron a edades superiores a los 28 días decrecieron mientras que en este trabajo se observa un aumento de los valores obtenidos. Las tasas iniciales en la totalidad de las muestras con agregado fino de este trabajo fueron inferiores a los obtenidos para concretos con ACR de la investigación de Bojacà (2013) para la edad de 28 días.

**Figura 25** Comparativo tasa secundaria de absorción

En la Figura 25 se observa una tendencia similar entre las mezclas, pero en este caso los valores son el 25% de los valores de la tasa inicial de absorción. En las mediciones de la tasa secundaria de absorción se observa que la mezcla con 100% arena sílice sin fibra (M1) está en primer lugar como la muestra que menor absorción tiene y en segundo lugar la mezcla con fibra y 25% de ACR vinculado (M3).

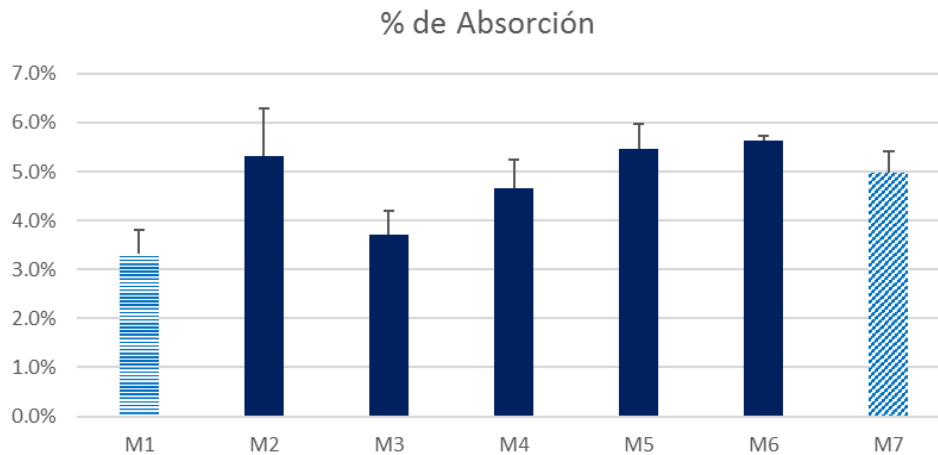
Como se observó en la Figura 25 entre la mezcla M1 (0% ACR sin fibra) y la M7 (100% agregado reciclado sin fibra) hubo una pequeña diferencia en la tasa de absorción. Para las mezclas adicionados con fibra excepto la M3 (25% ACR) tuvieron tasas de absorción mayores.

#### 4.2.6 Absorción, masa unitaria y porosidad

Este ensayo se aplicó sobre rodajas obtenidas de cilindros en la edad de 35 días; estas rodajas se obtuvieron mediante una cortadora donde se utilizaron las 2 rodajas sobrantes del ensayo de sortividad todas obtenidas de un mismo cilindro, a continuación, se encuentran las figuras donde se tabulan los datos correspondientes.



**Figura 26** Porcentaje de absorción a la edad 35 días

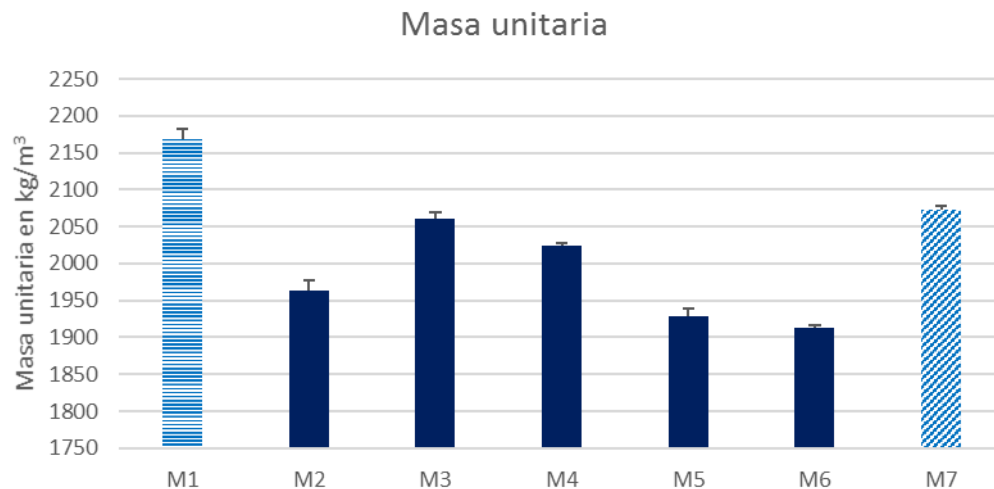


Como se observa en la figura anterior la mezcla de menor absorción es la mezcla con 100% arena sílice y sin fibra (M1) y muy cerca estuvo la mezcla con fibra y 25% de ACR (M3), a diferencia de la prueba del ISAT donde M3 fue de menor absorción que M1, las demás mezclas se encuentran en un estado de absorción similar al obtenido en el ensayo ISAT.

Teniendo en cuenta la Tabla 4-3 del manual de inspección “Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de concreto Armado (CYTED, 1997)” donde se clasifica el concreto dependiendo de su absorción, haciendo la salvedad que lo ensayado fue mortero se puede observar que las mezclas con 100% de arena de sílice sin fibra (M1), 25% ACR con fibra (M3) y 50% ACR con fibra (M4) estarían en un nivel de calidad moderada, el resto de mezclas dentro de un rango de durabilidad inadecuada, este comparativo puede indicarnos que el mortero puede ser susceptible a absorber sustancias nocivas que pueden afectar su durabilidad.

**Tabla 4-3** Valores para determinar la calidad por porcentaje de absorción(CYTED, 1997)

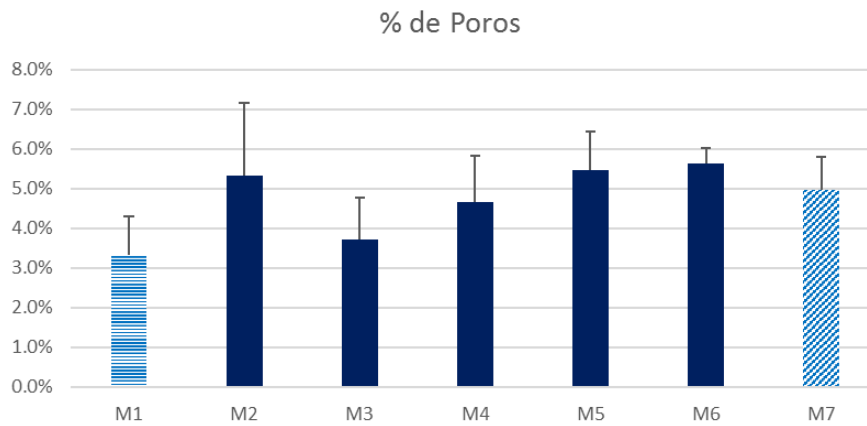
Absorción (%)	Tipo de Concreto
< 3	Buena calidad y compacidad
3 - 5	Moderada calidad
> 5	Durabilidad inadecuada

**Figura 27** Masa unitaria a la edad de 35 días

En la Figura 27 se puede observar un comportamiento similar al encontrado en las masas unitarias en estado fresco. La mezcla 25% ACR con fibra (M3) se mantuvo como la mejor entre las mezclas que tenían fibra y estuvo mucho más cercana a la masa unitaria de la mezcla 100% ACR sin fibra (M7) que mantuvo la segunda posición en el ensayo conservando la tendencia en la masa unitaria en estado fresco. La mezcla 100% arena sílice con fibra (M2) tuvo un cambio al no ser la de menor masa obteniendo una medida de 1950 kg/m<sup>3</sup> versus 1850 kg/m<sup>3</sup>, en el lugar de la menor masa estuvo la mezcla 100% ACR con fibra (M6) que adicionalmente fue la que tuvo la desviación de menor magnitud.

De acuerdo a la investigación realizada por Zhao, Remond, Damidot, & Xu (2015) se evidencia que estos morteros tienen densidades relativamente bajas (investigación sobre morteros comunes con adiciones con ACR en diversos porcentajes) en los cuales el mortero con 100% de ACR tuvo como densidad 2150 kg/m<sup>3</sup> y el de 0% de ACR tuvo la mayor masa con 2250 kg/m<sup>3</sup> valores que serían comparables a las mezclas M7 y M1 respectivamente exponiendo menores valores.

**Figura 28** Porcentaje de poros a la edad de 35 días



Analizando la Figura 28 se puede observar que concuerda con la masa unitaria ya que la mezcla 100% arena sílice sin fibra (M1) presenta la menor cantidad de poros, en este ensayo se resalta una gran desviación de los datos obtenidos debido a que los valores de porosidad no son tan grandes. Haciendo la salvedad de que lo trabajado en esta investigación fueron morteros se consideró comparar los valores obtenidos de porosidad con el criterio del Manual de Inspección, “Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de concreto Armado(CYTED, 1997)”, Tabla 4-4, donde se puede observar que la totalidad de las mezclas se encuentran en el rango de concretos de buena calidad y compactos.

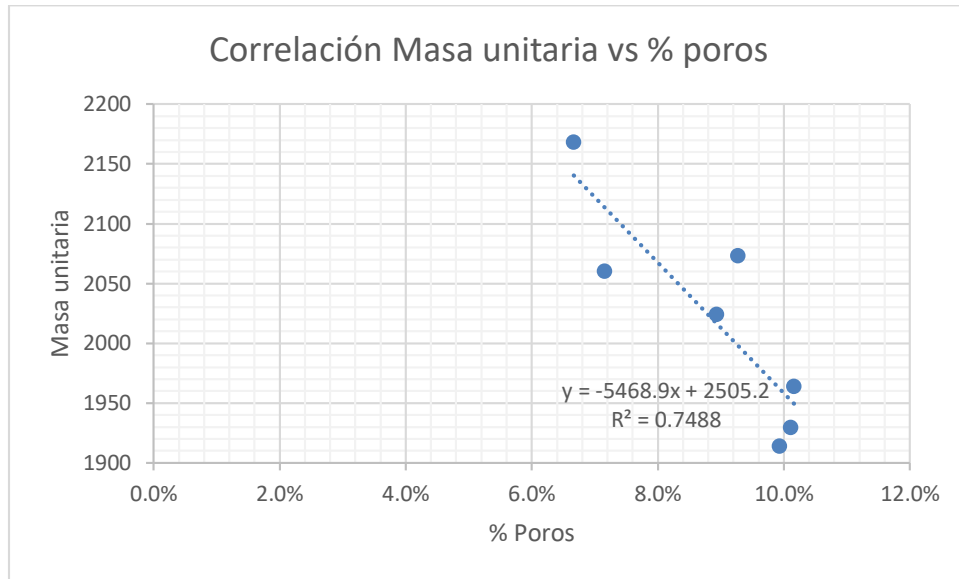
**Tabla 4-4** Clasificación de acuerdo a la porosidad (CYTED, 1997)

Porosidad	Característica del concreto
< 10%	Concreto de buena calidad y compacto
10 - 15%	Buen concreto, pero permeable y no adecuado para ambientes agresivos
>15%	Característica de concretos muy permeables e inadecuados para proteger la armadura a largo plazo

Adicionalmente a lo analizado se consideró la revisión de la correlación de los resultados de masa unitaria versus porcentaje de poros como se observa en la Figura 29 en donde se

obtuvo en estos dos parámetros un coeficiente de correlación muy bajo  $R^2 = 0.75$  determinando que para este material estas dos propiedades no pueden ser directamente relacionadas.

**Figura 29** Correlación entre masa unitaria versus porcentaje de poros



#### 4.2.7 Resistencia a la flexión

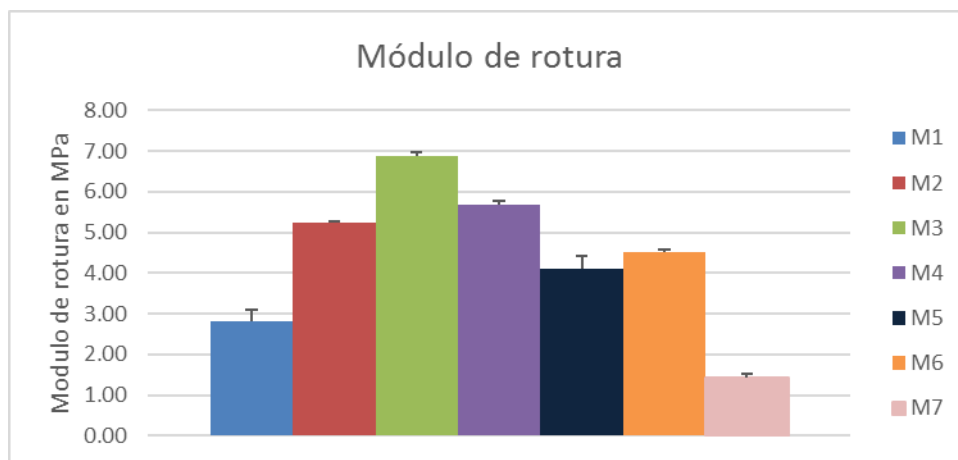
En la realización de este ensayo fue notable el aumento de la resistencia a la flexión en las probetas que contenían fibras, como se observa en la Figura 30 la mezcla 25% ACR con fibra (M3) tiene una resistencia superior al promedio entre las mezclas 100% sílice sin fibra (M1) y 100% ACR sin fibra (M7) de un 146% y versus la siguiente que es la 50% ACR con fibra (M4) de un 21%.

Las vigas que contenían fibra tuvieron fallas dúctiles que mantenían la integridad de la viga dada la gran cantidad de fibras que no dejaban que la viga se quebrara totalmente, mientras que en las vigas de las mezclas M1 y M7 las fallas fueron frágiles y apenas se veía aparecer la fisura en la parte inferior estas sucumbían ante la carga impuesta del montaje como se observa en la Figura 31. Respecto a la desviación estándar la que presentó una mayor desviación fue la mezcla 75% ACR con fibra (M5) con un valor del 0.30 MPa. El resto de probetas se encontraron por debajo del 0.11 MPa.



Estos datos fueron inferiores a los indicados en el artículo de (Comino et al., 1996) donde se indicaban rangos de resistencias a flexión de 10 a 14 MPa teniendo en cuenta los valores dados para mezclas del tipo premezclado y sin vincular los agregados reciclados, es probable una disminución del módulo de rotura debido a la porosidad en la fundición de estos elementos.

**Figura 30** Comparación de módulo de rotura



**Figura 31** Comparación del momento de falla de vigas a flexión, Mezcla con fibra (izq.); mezcla sin fibra (der)

Con el fin de verificar si en las mezclas con fibra (M2 a M6) se podría tener una constante  $k$  que relacione la resistencia a compresión y el módulo de rotura se hizo la Tabla 4-5 en donde se muestran los valores con los que se trabajó para poder solución a la ecuación:

$$\text{Modulo de rotura} = k \times \sqrt{\text{Resistencia a compresión}}$$

**Tabla 4-5** Revisión factor k relacionando resistencia a compresión y módulo de rotura

Mezcla	Resistencia compresión MPa	Raíz cuadrada R.C.	Módulo de Rotura MPa	Estimación Factor K
M1	61.38	7.83	2.82	0.36
M2	34.87	5.90	5.23	0.89
M3	47.50	6.89	6.87	1.00
M4	44.93	6.70	5.67	0.85
M5	35.66	5.97	4.11	0.69
M6	37.09	6.09	4.52	0.74
M7	50.59	7.11	1.44	0.20

Los valores k estuvieron entre 0.69 – 1.00 para las mezclas con fibra, teniendo en cuenta estos resultados es improbable el uso de un factor como este ya que la variación es significativa.

#### 4.2.8 Resistencia a sulfatos

Debido a que el objeto de este trabajo es lograr escoger un material que pueda ser utilizado para elementos prefabricados es muy probable que varios de los productos estén expuestos a suelos conteniendo algún tipo de sulfatos, por lo tanto, se decidió elaborar una revisión de las diferentes mezclas expuestas a una alta concentración de sulfato de magnesio.

Por cada mezcla se introdujeron 2 viguetas junto a 2 cilindros de 100mm por 200mm en la concentración de sulfatos; cada una de estas probetas tuvo cambios en la coloración presentando manchas blanquecinas lo cual según Garzòn (2013) se denomina etringita (Sulfo aluminato tricálcico) y portlandita (hidróxido de calcio). Como se observa en la Figura 32 la vigueta manifiesta en su pigmentación la afectación de los sulfatos mediante un tono blanquecino en toda la superficie, adicionalmente en la Figura 33 se observa que la superficie tuvo cambios en la textura que en un principio era perfectamente lisa y que ahora presenta pequeñas burbujas que en este caso logro desprender un fragmento laminar de la superficie del cilindro.

**Figura 32** Vigüeta en comparador digital luego de ser extraída de la concentración de sulfatos



**Figura 33** Afectación en la superficie del cilindro por sulfatos

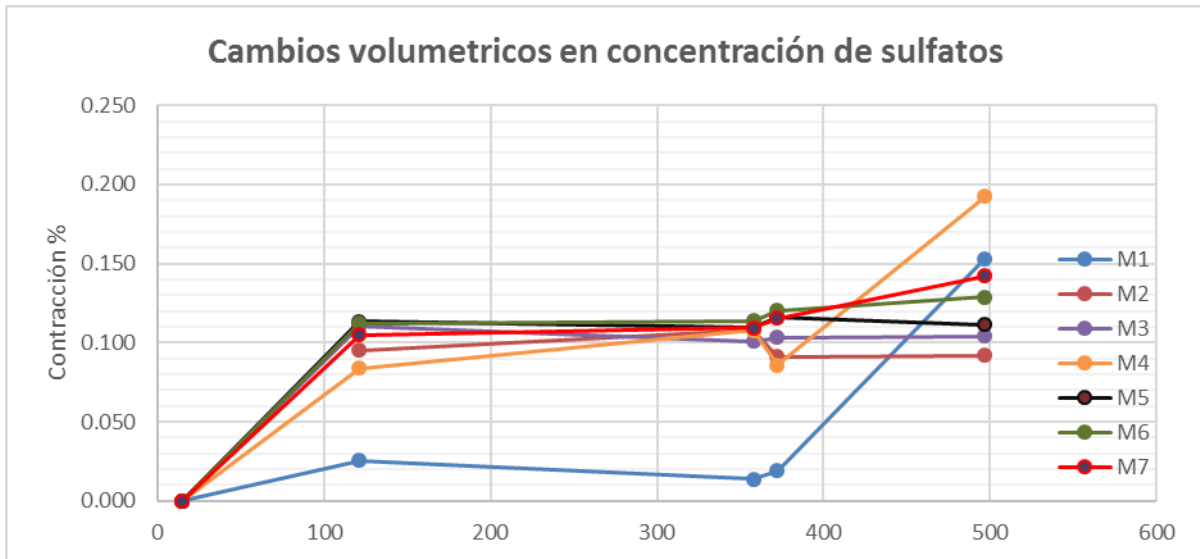


Una de las mezclas más afectadas visualmente fue la 75% ACR con fibra (M5) donde se observó el desprendimiento en la cara lateral del cilindro (Figura 33) en el resto de las mezclas se presentan las tonalidades blanquecinas y la pérdida de la textura lisa.

Realizando el análisis de los cambios volumétricos de las vigüetas que fueron sumergidas se pudo observar que las mezclas que más tuvieron cambios en sus dimensiones fueron la mezcla 100% Arena sílices sin fibra (M1) y la mezcla 50% ACR con fibra (M4) las cuales en

la medición en el día 497 tuvieron el mayor cambio, antes de esta medición se pudo observar que las mezclas en general tuvieron un comportamiento similar de expansión excepto la M1.

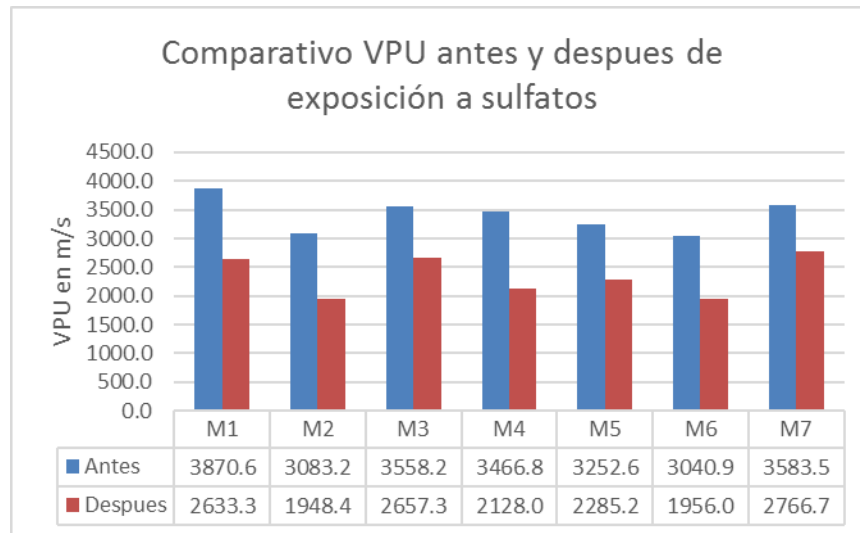
**Figura 34** Cambios volumétricos de viguetas en concentración de sulfatos



Con los cilindros se hizo una revisión de los cambios en diámetro y en altura, adicionalmente se realizó una medición de la VPU antes de fallarlos. Como resultado al verificar las dimensiones no se observó ningún cambio en diámetro o en altura; en las velocidades de pulso como se observa en la Figura 35 hay una reducción en las mediciones.

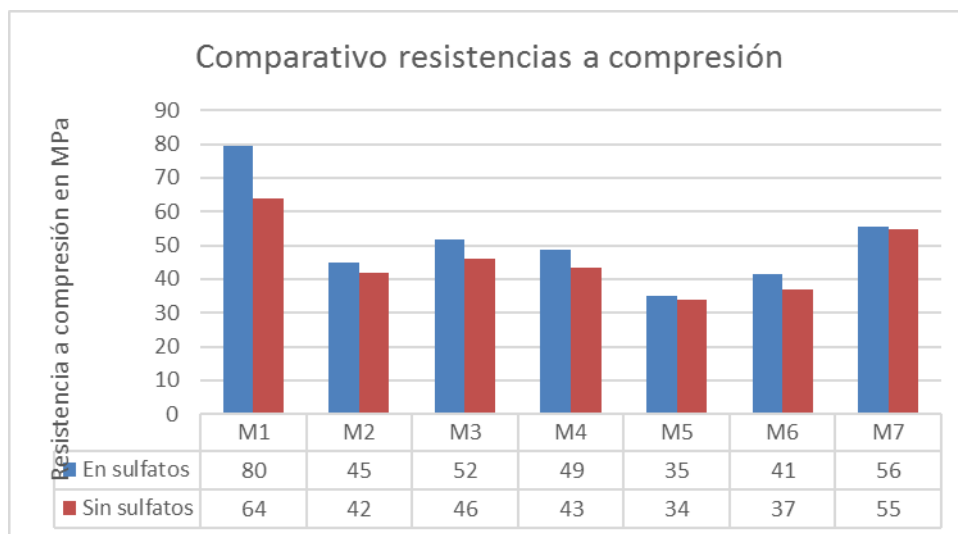


**Figura 35** Comparativo de VPU antes y después de exposición a sulfatos



Al finalizar estas mediciones se realizó la falla de cilindros a compresión para lo cual se contó con unos cilindros testigos los cuales estuvieron almacenados a la sombra para hacer el comparativo de resistencias de los dos ambientes, como resultado se observa una diferencia entre ambos ambientes donde se resalta una mejor resistencia en los cilindros que estaban expuestos a sulfatos. Es posible que debido al gran contenido de cemento la concentración de sulfatos no afectó la resistencia y contrario a esto la hidratación permanente de las probetas generó una mejora en este aspecto.

**Figura 36** Comparativo de resistencias a compresión entre cilindros expuestos a sulfatos y testigos



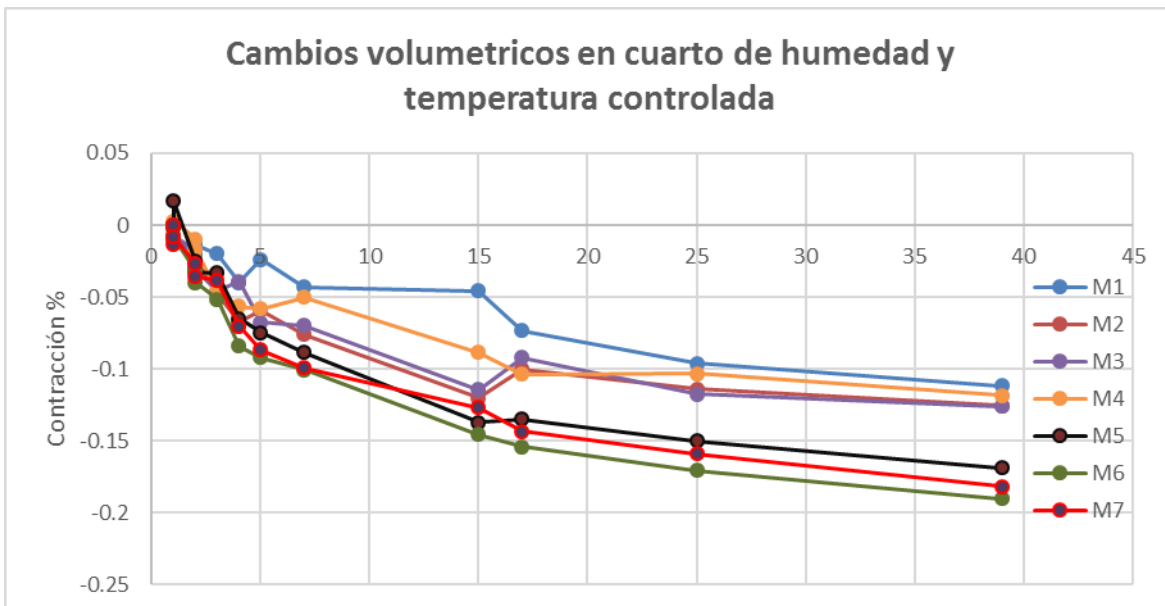
### 4.2.9 Contracción

En la elaboración de este ensayo se mantuvieron las probetas durante 45 días aproximadamente en el cuarto de humedad y temperatura controlada con temperaturas cercanas a 24 °C y una humedad del 50%, se realizaron mediciones con el comparador digital.

Analizando la Figura 37 este ensayo se observa que la mezcla con menores contracciones fue la 100% arena sílice sin fibra (M1) seguida de la 50% ACR con fibra (M4) aunque se puede observar que las mezclas 25% ACR con fibra (M3) y 100% arena sílice con fibra (M2) al finalizar la prueba estuvieron muy cercanas a la mezcla M1; por el contrario las mezclas M5, M6 y M7 fueron las que tuvieron las mayores contracciones cercanas al 0.17%, las mezclas M1 a la M4 estuvieron con una contracción cercana 0.12%.

Haciendo la revisión de estos resultados de cambios volumétricos con la investigación realizada por Torres (2014) donde revisó el comportamiento de varios concretos adicionados se pudo observar que las contracciones para los morteros de este trabajo fueron mucho mayores; las mezclas que contenían menor cantidad de agregado reciclado tuvieron las menores contracciones y la fibra al parecer no fue incidente en los valores

**Figura 37** Cambios volumétricos en cuarto de humedad y temperatura controlada

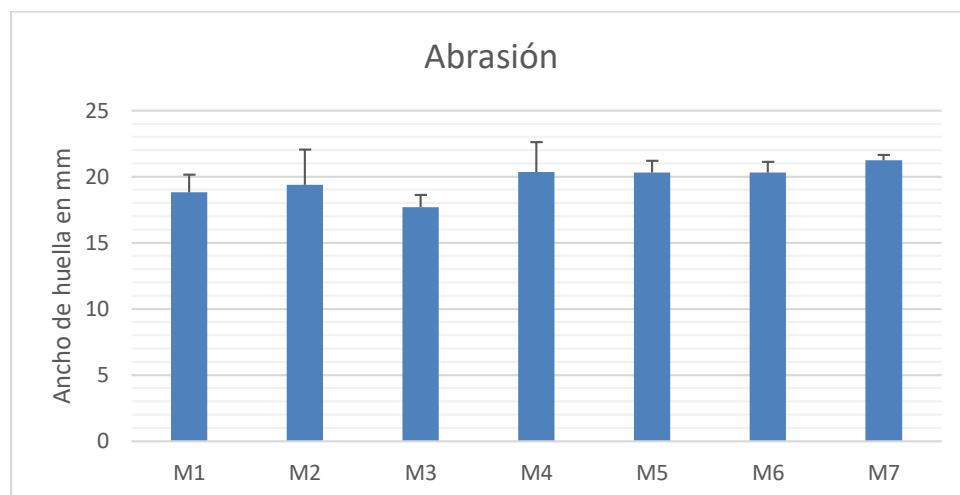


### 4.2.10 Abrasión

Teniendo en cuenta que la aplicación práctica de este trabajo es la elaboración de una plaqueta tipo deck se tuvo en cuenta la elaboración del ensayo de abrasión para determinar qué mezcla podría tener la mejor resistencia al desgaste usando la prueba de abrasión por medio de disco metálico y chorro de arena, para lo cual se utilizaron rodajas por cada mezcla, 3 unidades. El ensayo se realizó de acuerdo con las recomendaciones especificadas en la norma NTC 5147(Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión de materiales para pisos y pavimentos, mediante arena y disco metálico ancho)(ICONTEC, 2002), donde se debe demarcar la zona que se va a someter a abrasión mediante una franja pintada con marcador para poder evidenciar y trazar la huella de desgaste.

A continuación, en la Figura 38 se presentan los resultados de desgaste obtenidos en las diferentes muestras a la edad de 35 días.

**Figura 38** Comparativo ensayo de desgaste disco metálico y chorro de arena



Teniendo en cuenta la investigación relacionada en el estado del arte (Arango, 2006) la totalidad de las muestras están por debajo del límite de 23mm de huella, la más cercana al límite fue la mezcla 100% ACR sin fibra (M7) y la 50% ACR con fibra (M4), la mezcla que estuvo alejada del límite fue la mezcla 25% ACR con fibra (M3).



## 5 APLICACIÓN PRÁCTICA

### 5.1 Selección de mezcla

Con el objetivo de poner en práctica la utilización de la mezcla que tuvo mejor comportamiento se elaboró una plaqueta tipo deck de dimensiones 100cm de largo por 10cm de ancho y 2cm de espesor. Para la selección de la mezcla “óptima” se elaboró la Tabla 5-1, donde se ponderó el comportamiento de las diferentes mezclas frente a los diferentes ensayos realizados; para la ponderación se asignó un puntaje de 1 a la mezcla de mejor comportamiento y con 7 la de comportamiento menos favorable, al finalizar la sumatoria se muestra que la mezcla 25% ACR con fibra (M3) presentó el mejor comportamiento a lo largo de la investigación al obtener el menor sumatoria.

**Tabla 5-1** Matriz comparativa de resultados ensayos

ENSAYOS COMPARADOS	MEZCLAS							CRITERIO
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	
Masa Unitaria húmeda	1	7	3	4	5	6	2	Mayor masa
ISAT	7	6	1	4	2	5	3	Menor absorción
VPU	1	5	3	4	6	7	2	Mayor velocidad
Resistencia compresión	1	7	3	4	6	5	2	Mayor resistencia
Módulo de elasticidad	1	4	2	5	6	7	3	Mayor módulo
Sortividad	2	6	1	3	5	7	4	Menor tasa de absorción
Absorción	1	5	2	3	6	7	4	Menor absorción
Masa unitaria seco	1	5	2	4	6	7	3	Mayor masa
Porosidad	1	5	2	3	6	7	4	Menor porosidad
Flexión	6	3	1	2	5	4	7	Mayor resistencia
Sulfatos	6	1	2	7	3	4	5	Menor expansión
Contracción	1	4	3	2	5	7	6	Menor contracción

Abrasión	3	2	1	4	5	6	7	Menor abrasión
Mejor posición por uso de ACR	6	5	1	2	3	4	6	Mejor posición
Sumatoria	38	65	27	51	69	83	58	

Mejor puntaje



Menor puntaje

## 5.2 Revisión económica

Otro de los aspectos que se revisó fue el tema del costo, se tuvo como punto de comparación el valor para un mortero realizado con arena de sílice reforzado con fibra de vidrio (M2) contra otra que tuviese la mezcla al 75% de arena de sílice, 25% de arena reciclada (M3) también reforzado con fibra de vidrio estos valores se ven reflejados en la Tabla 5-2 y Tabla 5-3 respectivamente.

**Tabla 5-2** Precio por m<sup>3</sup> de concreto mezcla tipo M2

<b>MORTERO GRIS CON ARENA DE SILICE REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO</b>	<b>m<sup>3</sup></b>			<b>\$ 5,470,976</b>
AGUA	lt	243	\$ 31	\$ 7,594
CEMENTO GRIS	kg	1013	\$ 940	\$ 951,345
EQUIPO BASICO (Herramienta menor)	glb	0.135	\$ 3,750	\$ 506
MANO DE OBRA AA (Albañilería)	hc	6.75	\$ 20,088	\$ 135,591
ARENA DE SILICE	kg	1013	\$ 720	\$ 728,895
FIBRA DE VIDRIO	kg	70.88	\$ 30,419	\$ 2,155,929
MEZCLADORA	dd	0.27	\$ 49,500	\$ 13,365
PLASTIFICANTE	kg	4.556	\$ 43,343	\$ 197,481
POLIMERO	kg	50.63	\$ 25,264	\$ 1,278,993
DESMOLDANTE	kg	0.122	\$ 10,513	\$ 1,277

**Tabla 5-3** Precio por m<sup>3</sup> de concreto mezcla tipo M3

<b>CONCRETO GRIS CON ARENA DE SILICE 75 RECICLADA 25 REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO</b>	<b>m<sup>3</sup></b>			<b>\$ 5,313,538</b>
AGUA	lt	243	\$ 31	\$ 7,594
CEMENTO GRIS	kg	1013	\$ 940	\$ 951,345
EQUIPO BASICO (Herramienta menor)	glb	0.135	\$ 3,750	\$ 506
MANO DE OBRA AA (Albañilería)	hc	6.75	\$ 20,088	\$ 135,591
ARENA DE SILICE	kg	759.4	\$ 720	\$ 546,671
ARENA RECICLADA	kg	253.1	\$ 98	\$ 24,786
FIBRA DE VIDRIO	kg	70.88	\$ 30,419	\$ 2,155,929
MEZCLADORA	dd	0.27	\$ 49,500	\$ 13,365
PLASTIFICANTE	kg	4.556	\$ 43,343	\$ 197,481
POLIMERO	kg	50.63	\$ 25,264	\$ 1,278,993
DESMOLDANTE	kg	0.122	\$ 10,513	\$ 1,277

Revisando las tablas se observa una diferencia del 3% entre los valores por m<sup>3</sup> que puede ser un valor relativamente bajo pero analizando el beneficio ambiental de la reducción de la explotación de la arena de sílice, transporte y por otra parte la reutilización de materiales que anteriormente se disponían en rellenos puede ser una alternativa de utilización de estos materiales sin perder calidad y como se analizaba en la introducción; el uso de estos materiales es una manera de cumplir las actuales leyes ambientales en los procesos constructivos.

### 5.3 Producción

Teniendo seleccionada la mezcla se debió revisar el procedimiento de fundida para poder realizar un producto de la mejor calidad estética; la primera técnica utilizada fue el de fundida por medio de marco (ver Figura 40) en este caso el color de las piezas y terminado

final era dado por medio de un endurecedor de superficie<sup>6</sup> estas piezas presentaban un color relativamente uniforme como se observa en la Figura 39, pero se presentaban inconvenientes en la aplicación del endurecedor debido a que la instalación de este producto necesita un punto exacto de secado del mortero para fijarse y generar una capa perfecta con excelente acabado, el otro inconveniente es el desperdicio del producto al momento de la instalación pues la pieza en la cual se aplicaba era de 10 cm y mucho producto al momento de la aplicación quedaba fuera de la formaleta.

**Figura 39** Plaqueta tipo deck procedimiento con endurecedor de superficie



**Figura 40** Formaleta tipo marco



Otra de las desventajas de este procedimiento era la irregularidad en sus dimensiones y alabeo de la pieza, este procedimiento de fundición tenía dificultades debido al peso del

---

<sup>6</sup> FastStone Durocrete para estampado elaborado por la empresa Morteros Secos de Colombia.



marco que debía ser rígido para evitar que éste tuviese alabeos o irregularidades que inevitablemente se presentaron, pero en grado mínimo. Las piezas se vaciaron sobre mesa vibratoria y cuando se sacaban del marco tenían que ubicarse en superficies rectas para evitar que tomara otra forma. A estas piezas se les realizó una prueba de abrasión donde se encontró que tenían un buen comportamiento, pero se optó por revisar la técnica de vaciado para mejorar el producto.

Posteriormente luego de varios ensayos e investigaciones de maquinaria para la elaboración de estas piezas se revisó la técnica de vaciado por formaleta tipo bandeja (ver Figura 41), este ensayo tuvo varios inconvenientes pues se debió revisar el tiempo de uso de la formaleta por pieza ya que debido a la poca rotación (reutilización de la formaleta en la fabricación) el costo en la producción aumentaba y el rendimiento era muy bajo cuando se tenían pocas formaletas.

**Figura 41** Formaleta tipo bandeja



Como se observa en la Figura 42 se obtuvieron varios tonos de producción utilizando pigmentos para concreto con un mejor acabado y como paso final en la post producción se hizo la aplicación de un sellador para concretos con el fin de evitar que las piezas se mancharan y se puedan limpiar con mayor facilidad.

**Figura 42** Plaqueta tipo deck procedimiento tipo bandeja

Estas piezas tuvieron dos ensayos para la verificación de la calidad, como primer ensayo se revisó la resistencia a la flexión como se observa en Figura 44 y como segundo ensayo se elaboró la prueba de desgaste con disco metálico y chorro de arena para lo cual se contó con las secciones sobrantes de las plaquetas ensayadas a flexión como se muestra en la Figura 43.

**Figura 43** Secciones de plaqueta para ensayo de abrasión

**Figura 44** Montaje para ensayo a flexión de plaqueta tipo deck

En el ensayo de resistencia a la abrasión se utilizaron 4 piezas las cuales superaron la prueba con un promedio de ancho de huella de 19.8mm. Para el ensayo a flexión el resultado fue un módulo de rotura promedio de 7.13 MPa (4 unidades ensayadas) analizando que para una pieza de 2cm de espesor se observa un buen comportamiento para el tema del transporte y manipulación, sin embargo, esta plaqueta necesitará un apoyo completo para evitar exigencias superiores, así que en la instalación se sugiere usarlo como enchape sobre placas de concreto o fijado mediante morteros a bases de recebo de un excelente grado de compactación.

**Figura 45** Momento de la falla plaqueta tipo deck en ensayo a flexión

Teniendo en cuenta el buen comportamiento de estas mezclas en la elaboración de este producto se pueden dar más usos en el tema de urbanismo como lo pueden ser: Canecas, sillas para espacio publico, topellantas, etc. como se observa en la Figura 46.

**Figura 46** Ejemplos de prefabricados para urbanismo



## 6 Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

- Al caracterizar las mezclas seleccionadas se pudo determinar que el reemplazo parcial al 25% de arena reciclada en parte de los agregados finos puede ser una alternativa para la utilización de agregados reciclados dentro de morteros reforzados con fibra de vidrio, ya que no se desmejoran notablemente las propiedades de los morteros (GRC) convencionales de acuerdo a los parámetros de los proveedores de la fibra de vidrio (Comino et al., 1996).
- La ventaja en la adición con fibras pudo verse en el ensayo a flexión donde la mezcla escogida tuvo un aumento de la resistencia del 146% respecto al promedio de las mezclas patrón con un módulo de rotura de 6.87 MPa vs 2.13 MPa. En general las mezclas adicionadas con las fibras duplicaron el módulo de rotura de las muestras patrón.
- Las mezclas de esta investigación tuvieron resultados favorables en porosidad y absorción en comparación con las tablas del CYTED lo cual indica un buen comportamiento en la durabilidad.
- La totalidad de las mezclas expuestas a altas concentraciones de sulfatos tuvieron una resistencia superior en comparación con las que estaban colocadas a la sombra esta mejora en la resistencia pudo ser superior debido a que todo el tiempo estuvieron hidratadas y el alto contenido de cemento que tenían en su elaboración.
- Los materiales GRC en comparación con concretos convencionales son mucho más costosos por lo tanto la aplicación de estas mezclas tendrá que buscar la reducción del consumo en m<sup>3</sup> reduciendo espesores y mostrando las ventajas ergonómicas

para el personal que manipula los elementos prefabricados que representa disminución de pesos, mejor resistencia al impacto, reducción de costos en transporte y una mayor durabilidad.

- El desgaste por abrasión en la superficie de las mezclas superó las pruebas debido al contenido de sílice y alto contenido de cemento, lo cual propende en una mejora respecto a la resistencia, en este aspecto estando por debajo del límite de 23mm en ancho de huella.
- Los módulos de elasticidad obtenidos en las mezclas con fibra fueron menores a la muestra patrón que trabajó sin fibra y con el total contenido de arena sílice, esto indica un comportamiento de mayor tolerancia a las deformaciones en la zona elástica en las mezclas que contenían fibra.
- Las velocidades de pulso ultrasónico para este material fueron similares a las obtenidas en estudios como los de Torres (2014) y Laverde (2014) lo cual indica que este ensayo es un método que debe tratarse según sea el tipo de material estudiado ya que en este caso las resistencias a compresión fueron mayores a los otros estudios, por lo tanto solo conociendo la velocidad de pulso no se podría tener una idea de la resistencia para los diferentes materiales, este ensayo deberá ser complementario a la falla de cilindros.

## 6.2 Recomendaciones

- Se sugiere la utilización de métodos de vibrado mecánico en la elaboración de probetas cuando se tengan contenidos de fibra altos realizando varias mediciones para determinar el tiempo de vibrado y técnica exacta para lograr el mayor grado de compactación de estos elementos.
- Para próximas investigaciones se sugiere revisar la manera de obtención de los agregados reciclados finos realizando varias metodologías de triturado para revisar una posible mejora de la calidad de agregados obtenidos y con base en los resultados obtenidos considerar una elaboración de normas que regulen la calidad de agregados reciclados en plantas.

- Se podrían elaborar investigaciones de morteros reforzados con fibra de vidrio adicionados con vidrio triturado como reemplazo de parte del agregado fino en las mezclas.
- Dentro de adiciones en reemplazo del material cementante se podrían revisar cenizas volantes, humo de sílice o derivados de la industria que puedan ser utilizados en producción de materiales nuevos.
- Elaboración de modelos matemáticos con base en los resultados de futuras investigaciones referentes en el uso de fibras para la elaboración de elementos esbeltos con productos de fácil acceso en Colombia.
- Teniendo en cuenta la buena resistencia a la flexión se sugiere generar estudios de absorción de energía en este tipo de materiales.
- Se podrían elaborar investigaciones en el uso de estos materiales para elementos estructurales.





# A. **Anexo:** MEDIDAS DE PROTECCIÓN PERSONAL PARA EL MANEJO DE LOS MATERIALES

Teniendo en cuenta que se está trabajando con arena de sílice y fibra de vidrio se decidió realizar una revisión de los riesgos en el manejo de estas sustancias a continuación se hace un análisis de ambos materiales y los posibles riesgos que pueden generar sin el uso adecuado.

## **Arena de sílice**

Según el OSHA (Occupational Safety & Health Administration) la sílice está compuesta por tierra, arena, granito y muchos otros minerales, el cuarzo es la forma más común de la arena de sílice junto con la cristobalita y la tridimita estos pueden convertirse en partículas que se pueden inhalar cuando se talla, corta, perfora, mezcla o trituran objetos que contienen sílice.

Según el OSHA (U.S. Department of Labor & Occupational Safety and Health Administration, 2003) el polvo producido por estos procesos se va a los pulmones pudiendo producir enfermedades, la neumoconiosis es el grupo de enfermedades que son causadas por la acumulación de polvo en los pulmones y en este caso la silicosis es la enfermedad que se produce específicamente por la acumulación de polvo de sílice en los pulmones, existen tres tipos de silicosis clasificadas por el tiempo en que se evidencie la enfermedad la silicosis crónica (ocurre a los 15 o 20 años de exposición), silicosis acelerada (ocurre a los 10 años de exposición) y la silicosis aguda (ocurre a unos meses o 2 años después de la exposición). Los síntomas de cada una son pérdida del aliento, debilidad y pérdida de peso.

Frente a esta problemática el OSHA en la publicación “Exposición a la sílice cristalina” brinda información sobre riesgos de la salud para los trabajadores de la construcción, y aconseja las siguientes medidas para evitar o reducir el riesgo:

- Reemplazar materiales de sílice cristalina con sustancias seguras, cuando sea posible.
- Brindar controles de ingeniería y administración, en la medida de lo posible, tales como ventilación en la zona de trabajo y contenedores para la limpieza abrasiva. Donde se requiera reducir las exposiciones a niveles inferiores al límite permisible de exposición, utilizar equipo de protección u otras medidas de protección.
- Utilizar todas las prácticas de trabajo disponibles para controlar las exposiciones al polvo, tales como rociadores de agua.
- Utilizar solamente un respirador certificado “N95 NIOSH”, si se requiere protección respiratoria. No se debe modificar el respirador. No se debe utilizar un respirador apretado con una barba o con un bigote que impida un buen encaje entre el respirador y la cara.
- Utilizar solamente un respirador con alimentación de aire para limpieza abrasiva de tipo “Type CE” para la limpieza abrasiva.
- Utilizar ropa de trabajo que se pueda tirar o lavar y ducharse si se hallan duchas disponibles. Utilizar una aspiradora para limpiarse el polvo de la ropa o ponerse ropa limpia antes de salir del lugar de trabajo.
- Participar en la formación, la supervisión de exposición y los programas de análisis y vigilancia con el fin de monitorear cualquier efecto negativo en la salud debido a exposiciones de sílice cristalina.
- Tomar conciencia de las operaciones y tareas que crean exposiciones a la sílice cristalina en el lugar de trabajo y aprender cómo protegerse a sí mismo.
- Tomar conciencia de los peligros de salud asociados con las exposiciones a la sílice cristalina. El hecho de fumar empeora el daño a los pulmones que causan las exposiciones a la sílice.
- No comer, beber, fumar o utilizar productos cosméticos en zonas donde existe polvo de sílice cristalina. Limpiarse las manos y la cara fuera de las zonas que contienen polvo antes de realizar cualquiera de estas tareas.

## Fibra de vidrio

Actualmente es una de las fibras más utilizadas por ser reemplazo al asbesto el cual es un material cancerígeno y que fue usado en muchos productos de la industria y específicamente de la construcción, según (Owens Corning, 2013) en su ficha de seguridad la fibra de vidrio se clasifica como un elemento no cancerígeno bajo las regulaciones internacionales y las investigaciones realizadas por la agencia internacional para la investigación del cáncer (IARC por sus siglas en inglés), debido a su grueso diámetro es poco probable que llegue a los pulmones, sin embargo cuando se corta o se pulen los elementos reforzados con esta fibra el material particulado puede inhalarse, tratándose como un elemento no tóxico el cuerpo se encargará de su eliminación.

Los malestares más comunes es la irritación de la piel en caso de estar en contacto directo, en casos más particulares la inhalación de polvo o el contacto con los ojos, para las anteriores situaciones se aconsejan los siguientes procedimientos:

Contacto con los ojos: Lavar inmediatamente con agua, también debajo de los párpados, por lo menos durante 15 minutos, no frotar o rascar los ojos y si continúa la irritación de los ojos, consultar a un especialista.

Contacto con la piel: En caso de irritación lavar inmediatamente con jabón y agua fría, no utilizar el agua caliente porque esto abrirá los poros de la piel, que causará la penetración adicional de las fibras; no frotar ni rascar las áreas afectadas. Quitar las ropas contaminadas y si continúa la irritación de piel, llamar al médico.

Inhalación: En caso de la irritación de zona respiratoria superior salir al aire libre y en el caso de molestias prolongadas llamar al médico.

Algunas de las medidas aconsejadas por la ficha de seguridad son:

Disposiciones de ingeniería: Proporcione el extractor local y/o la ventilación general para mantener la exposición debajo de límites reguladores y recomendados. El sistema de la aspiración del polvo se debe utilizar en las operaciones de transferencia, en el corte, en la

maquinaria o en otros procesos que generan polvo. El vacío o los métodos mojados de la limpieza deben ser utilizados.

*Protección personal:* Protección respiratoria Cuando las concentraciones están sobre límites de la exposición, las máscaras apropiadas anti-polvo deben ser usadas (FFP1 o FFP2 dependiendo de la concentración aerotransportada real). Protección de ojos/cara mediante gafas protectoras con laterales cubiertas. Protección de la piel y del Cuerpo mediante guantes protectores, camisa con mangas largas y pantalones largos.

*Buenas prácticas de higiene inpolvorial:* Lavarse las manos antes de los descansos e inmediatamente después de manipular la sustancia. Evitar el contacto con la piel, los ojos y las ropas. Evitar la introducción de polvo en las botas, en los guantes y en el borde de los pantalones. Quitar y lavar las ropas contaminadas antes de reutilizar.

## B. Anexo: Datos Resultados Ensayo Tasa De Absorción Inicial

**Tabla B-1** Resultados promedios ensayo ISAT a 10 min edades 35 y 90 días

MEZCLAS	ENSAYO ISAT 10 MIN			
	PROMEDIO DIA 35	Desviación estándar	PROMEDIO DIA 90	Desviación estándar
	$ml/(m^2*s)$		$ml/(m^2*s)$	
M1	0.128	0.013	0.131	0.008
M2	0.111	0.045	0.153	0.017
M3	0.061	0.012	0.075	0.006
M4	0.119	0.036	0.116	0.032
M5	0.096	0.032	0.097	0.005
M6	0.120	0.022	0.117	0.017
M7	0.097	0.014	0.096	0.002

**Tabla B-2** Resultados promedios ensayo ISAT a 20 min edades 35 y 90 días

MEZCLAS	ENSAYO ISAT 20 MIN			
	PROMEDIO DIA 35	Desviación estándar	PROMEDIO DIA 90	Desviación estándar
	$ml/(m^2*s)$		$ml/(m^2*s)$	
M1	0.071	0.021	0.063	0.015
M2	0.075	0.031	0.068	0.007
M3	0.034	0.004	0.038	0.002
M4	0.079	0.027	0.066	0.027
M5	0.072	0.013	0.061	0.002
M6	0.073	0.018	0.067	0.011
M7	0.064	0.010	0.059	0.013

**Tabla B-3** Resultados promedios ensayo ISAT a 20 min edades 35 y 90 días

ENSAYO ISAT 30 MIN
--------------------

MEZCLAS	PROMEDIO DIA 35	Desviación estándar	PROMEDIO DIA 90	Desviación estándar
	<i>ml/(m<sup>2</sup>*s)</i>		<i>ml/(m<sup>2</sup>*s)</i>	
M1	0.055	0.013	0.052	0.009
M2	0.060	0.025	0.054	0.003
M3	0.024	0.004	0.029	0.002
M4	0.044	0.007	0.043	0.025
M5	0.058	0.015	0.036	0.007
M6	0.057	0.011	0.045	0.005
M7	0.052	0.008	0.044	0.013

## C. Anexo: Datos Resultados Ensayo Resistencia A Compresión

**Tabla C-1** Resultados ensayo resistencia a compresión a 3 días

Mezclas	Resistencia a la compresión en MPa			
	Probeta A	Probeta B	Probeta C	Promedio
M1	12.96	27.24	16.08	18.76
M2	16.08	13.20	16.12	15.13
M3	23.40	23.28	24.36	23.68
M4	23.64	21.21	22.08	22.31
M5	17.52	18.60	16.36	17.50
M6	19.80	12.61	19.20	17.20
M7	29.55	28.80	28.40	28.92

**Tabla C-2** Resultados ensayo resistencia a compresión a 37 días

Mezclas	Resistencia a la compresión en MPa			
	Probeta D	Probeta E	Probeta F	Promedio
M1	59.77	61.45	62.92	61.38
M2	33.85	34.27	36.48	34.87
M3	46.51	47.98	48.01	47.50
M4	45.05	44.56	45.20	44.93
M5	36.72	32.32	37.95	35.66
M6	38.31	36.49	36.49	37.09
M7	50.68	50.68	50.43	50.59

**Tabla C-3** Resultados ensayo resistencia a compresión a 90 días

Mezclas	Resistencia a la compresión en MPa			
	Probeta G	Probeta H	Probeta I	Promedio
M1	62.17	60.96	67.57	63.57
M2	36.73	34.03	37.95	36.23
M3	51.41	46.88	48.25	48.85
M4	45.90	45.17	48.32	46.46
M5	36.84	35.74	37.21	36.60
M6	39.41	41.13	41.53	40.69
M7	58.75	60.96	57.53	59.08



## D. Anexo: Datos Resultados Ensayo Velocidad De Pulso Ultrasónico

**Tabla D-1** Resultados promedio ensayo velocidad de pulso ultrasónico

M1	VELOCIDAD DE PULSO ULTRASONICO EN m/s					
	PROMEDIO A 3 DIAS	Desviación estándar	PROMEDIO A 37 DIAS	Desviación estándar	PROMEDIO A 90 DIAS	Desviación estándar
M1	3575.10	9.07	3938.43	17.13	3993.34	57.32
M2	3095.59	44.03	3477.06	66.10	3486.06	14.39
M3	3283.97	23.46	3676.95	34.45	3695.41	43.43
M4	3194.35	27.13	3570.99	3.30	3629.97	43.91
M5	3160.38	25.43	3403.19	63.92	3446.91	9.88
M6	3062.16	22.65	3389.41	60.24	3419.48	54.53
M7	3430.61	10.28	3749.27	12.06	3764.62	48.60



## E. Anexo: Datos Resultados Ensayo Modulo De Elasticidad

**Tabla E-1** Resultados promedio ensayo Modulo de elasticidad

Mezclas	MODULO DE ELASTICIDAD EN MPa					
	PROMEDIO A 3 DIAS	Desviación estándar	PROMEDIO A 37 DIAS	Desviación estándar	PROMEDIO A 90 DIAS	Desviación estándar
M1	7320.4	1615.9	9488.8	570.9	9863.4	1990.2
M2	5028.7	717.9	6741.2	304.8	6912.3	346.4
M3	5971.7	221.9	9344.6	475.9	8625.8	489.5
M4	5799.6	352.9	7222.3	241.5	5930.4	1381.0
M5	5249.2	370.4	5052.5	602.4	5575.3	69.6
M6	4879.8	141.0	6221.3	1034.2	5373.8	291.6
M7	6797.0	26.5	6454.9	235.4	7878.8	715.9



## F. Anexo: Datos Resultados Ensayo Sortividad

**Tabla F-1** Resultados promedio ensayo sortividad tasa inicial de absorción

Mezcla	TASA INICIAL DE ABSORCIÓN EN mm /vseg	
	Promedio a 37 días	Promedio a 90 días
M1	0.0022	0.004
M2	0.0041	0.0049
M3	0.0018	0.0028
M4	0.0024	0.0031
M5	0.0038	0.0051
M6	0.0043	0.0052
M7	0.0031	0.0031

**Tabla F-2** Resultados promedio ensayo sortividad tasa secundaria de absorción

Mezcla	TASA SECUNDARIA DE ABSORCIÓN EN mm /vseg	
	Promedio a 37 días	Promedio a 90 días
M1	0.0004	0.001
M2	0.001	0.0017
M3	0.0004	0.0011
M4	0.0007	0.0014
M5	0.001	0.0019
M6	0.0011	0.002
M7	0.0006	0.0006



## G. Anexo: Datos Resultados Ensayo Absorción, Masa Unitaria Y Porosidad

**Tabla G-1** Resultados promedio ensayo absorción, masa unitaria y porosidad

MEZCLAS	ABSORCIÓN (%)	Desviación estándar	Masa unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	Desviación estándar	% POROS	Desviación estándar
M1	3.3%	0.5%	2167.82	15.30	6.7%	1.0%
M2	5.3%	1.0%	1963.56	14.45	10.2%	1.8%
M3	3.7%	0.5%	2060.30	8.48	7.2%	1.1%
M4	4.6%	0.6%	2024.12	3.47	8.9%	1.2%
M5	5.5%	0.5%	1929.20	9.04	10.1%	1.0%
M6	5.6%	0.1%	1913.63	2.69	9.9%	0.4%
M7	5.0%	0.4%	2073.22	4.54	9.3%	0.8%





## H. Anexo: Datos Resultados Ensayo Resistencia A La Flexión

Tabla H-1 Resultados ensayo flexión

<i>Muestra</i>	<i>Fuerza</i>	<i>Fuerza</i>	<i>Modulo rotura</i>	<i>Promedio</i>
	<i>(kg f)</i>	<i>(N)</i>	<i>(MPa)</i>	<i>(MPa)</i>
F1M1A	1953	19152.39	2.55	2.82
F1M1B	2362.5	23168.21	3.09	
F1M2A	4038	39599.25	5.28	5.23
F1M2B	3968	38912.79	5.19	
F2M3A	5340	52367.51	6.98	6.87
F2M3B	5162	50621.93	6.75	
F2M4A	4420	43345.39	5.78	5.67
F2M4B	4259	41766.52	5.57	
F3M5A	3383	33175.90	4.42	4.11
F3M5B	2902	28458.90	3.79	
F3M6A	3500	34323.28	4.58	4.52
F3M6B	3414	33479.90	4.46	
F3M7A	1046	10257.76	1.37	1.44
F3M7B	1157	11346.29	1.51	



# I. Anexo: Datos Resultados Ensayo Resistencia A Sulfatos

**Tabla I-1** Resultados de mediciones viguetas

MEDIDAS EN %										
dia	M1	M2	dia	M3	dia	M4	dia	M5	M6	M7
15	0.000	0.000	14	0.000	13	0.000	13	0.000	0.000	0.000
121	0.026	0.095	120	0.110	119	0.084	119	0.114	0.112	0.105
358	0.014	0.108	357	0.101	356	0.108	356	0.110	0.114	0.109
372	0.019	0.091	371	0.103	370	0.086	370	0.116	0.121	0.116
497	0.153	0.092	496	0.104	495	0.193	495	0.112	0.129	0.142

**Tabla I-2** Diámetros y alturas promedio antes y después de exposición a sulfatos

MUESTRA	Diámetro Promedio antes de sulfatos (cm)	Diámetro Promedio después de sulfatos (cm)	Altura Promedio antes de sulfatos (cm)	Altura Promedio después de sulfatos (cm)
F1M1N	10.1	10.145	19.7	19.77
F1M1Ñ	10.2	10.265	19.6	19.8
F1M2N	10.05	10.18	20.35	20.295
F1M2Ñ	10.0	10.0	19.9	19.8
F2M3N	10.2	10.2	20.4	20.4
F2M3Ñ	9.9	9.9	20.0	20.1
F2M4N	10.2	10.2	20.4	20.4
F2M4Ñ	10.2	10.0	20.4	20.5
F3M5N	10.2	10.2	20.3	20.3
F3M5Ñ	10.1	10.1	20.5	20.3
F3M6N	10.2	10.2	20.4	20.4
F3M6Ñ	10.1	10.2	20.4	20.3
F3M7N	10.2	10.3	20.1	20.1
F3M7O	10.3	10.3	20.3	20.3

**Tabla I-3** Resultados promedios velocidades de pulso

	Velocidad antes de sulfatos m/s	Velocidad despues de sulfatos m/s
M1	3870.6	2633.3
M2	3083.2	1948.4
M3	3558.2	2657.3
M4	3466.8	2128.0
M5	3252.6	2285.2
M6	3040.9	1956.0
M7	3583.5	2766.7

**Tabla I-4** Resultados promedio de Resistencias a compresión cilindros en sulfatos y testigos

	Resistencia a compresión con sulfatos (Mpa)	Resistencia a compresión sin sulfatos (Mpa)
M1	80	64
M2	45	42
M3	52	46
M4	49	43
M5	35	34
M6	41	37
M7	56	55

# J.Anexo: Datos Resultados Ensayo Contracción

**Tabla J-1** Resultados promedio ensayo contracción

CONTRACCIONES EN %										
día	M1	M2	día	M3	día	M4	día	M5	M6	M7
1	0.000	0.000	1	0.000	2	0.000	1	0.000	0.000	0.000
1	-0.008	-0.010	1	-0.003	2	-0.003	1	-0.001	-0.009	-0.013
1	-0.008	-0.010	1	-0.008	2	0.003	1	0.017	-0.008	-0.008
2	-0.020	-0.028	2	-0.017	3	-0.009	2	-0.025	-0.032	-0.027
2	-0.014	-0.024	2	-0.030	3	-0.017	2	-0.032	-0.040	-0.036
3	-0.020	-0.048	3	-0.046	5	-0.047	3	-0.033	-0.052	-0.039
4	-0.040	-0.067	4	-0.039	6	-0.057	5	-0.065	-0.084	-0.070
5	-0.024	-0.059	6	-0.068	7	-0.058	6	-0.075	-0.092	-0.087
7	-0.043	-0.076	7	-0.070	8	-0.050	7	-0.088	-0.101	-0.099
15	-0.046	-0.120	14	-0.115	13	-0.089	13	-0.137	-0.146	-0.127
17	-0.073	-0.100	17	-0.092	14	-0.104	15	-0.135	-0.154	-0.143
25	-0.096	-0.114	24	-0.118	23	-0.103	23	-0.150	-0.170	-0.159
39	-0.112	-0.125	38	-0.126	37	-0.118	37	-0.169	-0.190	-0.182
84	-0.121	-0.129	83	-0.132	82	-0.129	82	-0.179	-0.205	-0.203



# K. Anexo: Datos Resultados Ensayo Abrasión

**Tabla K-1** Resultados ensayo abrasión

<i>Muestra</i>	<i>Medida 1</i>	<i>Medida 2</i>	<i>Medida 3</i>	<i>Promedio por probeta</i>	<i>Promedio por mezcla</i>
	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
F1M1J	20.11	20.32	20.58	20.34	18.83
F1M1K	16.9	17.09	17.45	17.15	
F1M1L	19.11	18.85	19.03	19.00	
F1M2J	21.38	21.48	21.07	21.31	19.37
F1M2K	20.97	21.28	21.33	21.19	
F1M2L	15.18	15.71	15.9	15.60	
F2M3J	17.37	17.68	17.21	17.42	17.68
F2M3K	16.55	16.62	16.86	16.68	
F2M3L	19.03	18.86	18.92	18.94	
F2M4J	21.27	21.12	20.95	21.11	20.35
F2M4K	22.82	22.52	22.61	22.65	
F2M4L	17.29	17.42	17.18	17.30	
F3M5J	19.11	19.27	19.52	19.30	20.29
F3M5K	19.9	20.29	20.01	20.07	
F3M5L	21.63	21.5	21.4	21.51	
F3M6J	20.72	20.5	20.49	20.57	20.32
F3M6K	19.08	19.27	19.4	19.25	
F3M6L	21.33	20.84	21.22	21.13	
F3M7J	21.21	21.22	21.05	21.16	21.22
F3M7K	20.96	20.57	20.63	20.72	
F3M7L	21.63	21.89	21.81	21.78	





## 7 Bibliografía

- Abdullah, M. M., & Jallo, E. K. (2011). Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Concrete. *Al-Rafidain Engineering*, 20(5), 128–136.
- American Society for Testing Materials. (2004). ASTM C 1585-04: Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes, 41(147), 6.
- Arango, J. F. (2006). Adoquines de concreto propiedades físico mecánicas y sus correlaciones. *Revista Tecnologías*, (16). Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344234272007>
- Astm C 490. (2011). Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste , Mortar , and Concrete. *ASTM International, West Conshohocken*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0490>
- ASTM International. (1997). ASTM C 642 Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. *Annual Book of ASTM Standards*, (March), 1–3.
- ASTM International. ASTM C1012 Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution, 11ASTM International, West Conshohocken, PA 5–9 (2015).
- Barbudo, A., De Brito, J., Evangelista, L., Bravo, M., & Agrela, F. (2013). Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, 59, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.022>
- Bojacà, N. (2013). *Propiedades Mecánicas Y De Durabilidad De Concretos Con Agregado Reciclado*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Bojacà, N., & Torres, N. (2013). Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado. *ACI Publicaciones Técnicas*, XXVI, 14–20.
- Chávez, Á., Mejía, A. M., & Bernal, O. J. (2010). Análisis de información sobre el manejo y gestión de escombros a nivel nacional e internacional. *Universidad Militar Nueva Granada*. Retrieved from [http://www.umng.edu.co/documents/10162/745280/V3N1\\_11.pdf](http://www.umng.edu.co/documents/10162/745280/V3N1_11.pdf)
- Comino, P. I., Romero, J. C., & Saint Gobain Vetrotex. (1996). *El GRC Material Compuesto de Matriz Cementicia reforzado Con fibra de Vidrio AR*. Retrieved from <http://www.hormigonespecial.com/~documentacion/P.Comino->

JC.Romero\_EL\_GRC.pdf

- Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sostenible WBCSD. (2009). *Iniciativa por la Sostenibilidad del Cemento. Reciclando Concreto* (ISBN: 978-3-940388-49-0). Retrieved from [http://www.wbcdcement.org/pdf/CSI-RecyclingConcrete-FullReport \(Spanish\).pdf](http://www.wbcdcement.org/pdf/CSI-RecyclingConcrete-FullReport(Spanish).pdf)
- CYTED. (1997). Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión de estructuras de hormigón armado. España.
- De las Heras, S. (2002, January 4). La pesada “carga” de los escombros. Retrieved from <http://www.elmundo.es/suvienda/2002/234/1010072734.html>
- Evangelista, L., & de Brito, J. (2007). Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 29(5), 397–401. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.004>
- Evangelista, L., & de Brito, J. (2010). Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 32(1), 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.09.005>
- Evangelista, L., Guedes, M., De Brito, J., Ferro, A. C., & Pereira, M. F. (2015). Physical, chemical and mineralogical properties of fine recycled aggregates made from concrete waste. *Construction and Building Materials*, 86, 178–188. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.112>
- Fan, C. C., Huang, R., Hwang, H., & Chao, S. J. (2015). The effects of different fine recycled concrete aggregates on the properties of Mortar. *Materials*, 8(5), 2658–2672. <https://doi.org/10.3390/ma8052658>
- Ferreira, J. P. J. G., & Branco, F. A. B. (2007). The Use of Glass Fiber-Reinforced Concrete As a Structural Material, (June), 64–74. <https://doi.org/10.1111/j.1747-1567.2007.00153.x>
- Fonseca, N., De Brito, J., & Evangelista, L. (2011). The influence of curing conditions on the mechanical performance of concrete made with recycled concrete waste. *Cement and Concrete Composites*, 33(6), 637–643. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.002>
- Garzón, W. (2013). *Estudio De Durabilidad Al Ataque De Sulfatos Del Concreto Con Agregado Reciclado*. Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://core.kmi.open.ac.uk/download/pdf/12818497.pdf>
- ICONTEC. (1997a). NTC 120 Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión de morteros de cemento hidráulico. *Norma Técnica Colombiana*, 9.
- ICONTEC. NTC 4325 Método de ensayo para la determinación de la velocidad del pulso ultrasónico, Pub. L. No. NTC 4325 (1997). Colombia.
- ICONTEC. NTC 5147 Método de ensayo para determinar la resistencia a la abrasión de

- materiales para pisos y pavimentos mediante arena y disco metalico (2002). Colombia.
- ICONTEC. NTC 673 Ensayo de Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto (2010). Colombia.
- Kim, G. B., Pilakoutas, K., & Waldron, P. (2008). Thin FRP/GFRC structural elements. *Cement and Concrete Composites*, 30(2), 122–137. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.04.011>
- Laverde, J. A. (2014). *Propiedades mecánicas , eléctricas y de durabilidad de concretos con agregados reciclados . Propiedades mecánicas , eléctricas y de durabilidad de concretos con agregados reciclados .* Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Owens Corning. (2010). *Anti-Crak® HD Hilos cortados AR para el control y prevención de la fisuración del hormigón®.* Alcalá de Henares. <https://doi.org/10010194-D>
- Owens Corning. (2013). *HOJA DE INSTRUCCIONES DEL USO SEGURO Por productos de las fibras de vidrio de filamento continuo.* Toledo.
- Pastor, J. M., García, L. D., Quintana, S., & Peña, J. (2014). Glass reinforced concrete panels containing recycled tyres: Evaluation of the acoustic properties of for their use as sound barriers. *Construction and Building Materials*, 54, 541–549. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.040>
- Pedro, D., De Brito, J., & Evangelista, L. (2014). Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Construction and Building Materials*, 71, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.030>
- Pereira, P., Evangelista, L., & De Brito, J. (2012). The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 28(1), 722–729. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.050>
- Sujivorakul, C., Jaturapitakkul, C., & Taotip, A. (2011). Utilization of Fly Ash, Rice Husk Ash, and Palm Oil Fuel Ash in Glass Fiber–Reinforced Concrete. *Journal of Materials in Civil ...*, 0(SEPTEMBER), 1281–1288. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000299](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000299).
- Torres, N. (2014). *ESTUDIO EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO DE CONCRETOS ADICIONADOS CON CATALIZADOR DE CRAQUEO CATALÍTICO USADO (FCC).* Universidad Nacional de Colombia.
- U.S. Department of Labor, & Occupational Safety and Health Administration. (2003). “Exposición a la sílice cristalina” Información sobre riesgos de la salud para los trabajadores de la construcción., *OSHA 3179*. Retrieved from <http://www.osha.gov/Publications/osha3179.pdf>
- Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos. (2012). *Escombros Cero UAESP. Primer Foro Internacional Para La Gestión Y Control de Residuos de La Construcción*

Y *Demolición*. Retrieved from  
[http://ambientebogota.gov.co/en/c/document\\_library/get\\_file?uuid=3b9c54a8-c9ae-4d2b-94a9-ef670b28c6c2&groupId=664482](http://ambientebogota.gov.co/en/c/document_library/get_file?uuid=3b9c54a8-c9ae-4d2b-94a9-ef670b28c6c2&groupId=664482)

Zhao, Z., Remond, S., Damidot, D., & Xu, W. (2015). Influence of fine recycled concrete aggregates on the properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 81, 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.037>