

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

Diseño de mezclas de hormigón con fibras metálicas de refuerzo y polvo de caucho reciclado para mejorar el desempeño ante impactos en losas de contrapiso de CrossFit.

Trabajo de Investigación

Néstor Andrés León Arregui

Ingeniería Civil

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de Ingeniero Civil

Quito, 14 de mayo de 2019

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍAS

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

Diseño de mezclas de hormigón con fibras metálicas de refuerzo y polvo de caucho reciclado para mejorar el desempeño ante impactos en losas de contrapiso de CrossFit.

Néstor Andrés León Arregui

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Ing. Gustavo Tapia, MDI

Firma del profesor

Quito, 14 de mayo de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante: _____

Nombres y apellidos: Néstor Andrés Leon Arregui

Código: 00127097

Cédula de Identidad: 172476904-5

Lugar y fecha: Quito, 14 de mayo de 2019

AGRADECIMIENTOS

Agradezco en primer lugar a mi Padre y Madre por el apoyo incondicional durante el trayecto de mi formación como persona y como profesional, por los sacrificios realizados para verme poder alcanzar esta meta. A familiares y amigos más cercanos por el aliento constante durante el trayecto de esta carrera de ingeniería. A Pablo Vega, dueño del box CrossFit Cumbayá por el permiso de uso de sus instalaciones para poder realizar la aplicación de este trabajo de titulación. Agradezco también a los proveedores de Beakert y Rubber Action por la donación de materiales, junto con el departamento de Ingeniería civil de la Universidad San Francisco por el apoyo económico brindado en esta investigación cuyos resultados espero sean de interés mutuo. Agradezco también a mi director de tesis Gustavo Tapia por la guía brindada durante el proceso de la presente investigación.

RESUMEN

El hormigón por sí solo no posee gran capacidad de resistencia a cargas dinámicas (impactos), se podría incrementar su resistencia a la compresión para poder contrarrestar esta deficiencia, pero presenta un comportamiento frágil conforme la relación w/c se reduce. Las soluciones encontradas y que serán aplicadas en el presente trabajo de investigación comparadas con el hormigón convencional, son incrementar la ductilidad y tenacidad del hormigón con la adición de fibras metálicas con porcentajes de 1% y 2% en volumen, además de otra mezcla con la adición de partículas de caucho reciclado como reemplazo del agregado fino en un 7% y 15% junto con un 10% de Sílica Fume del cementante principal para contrarrestar el efecto de vacíos que genera este material resiliente en la matriz del hormigón. Finalmente, una vez evaluada la mezcla con un mejor desempeño ante impactos, entre otras características, se realizó la aplicación de la mezcla en un box de CrossFit para futuras observaciones de desempeño ante impactos durante su vida útil y evaluar niveles de daño reales.

Palabras clave: Fibras Metálicas, Caucho, Hormigón, Sílica Fume, Losa de Contrapiso, Ductilidad, Tenacidad, CrossFit.

ABSTRACT

Concrete does not have a great capacity of resistance to dynamic loads or impacts by itself, the compressive strength could be increased to counteract this deficiency, but it has a fragile behavior as the w/c ratio is reduced. The solutions that has been found and that will be applied in this research work compared with conventional concrete, are the increase of ductility and tenacity of concrete with the addition of steel-fiber in percentages of 1% and 2% of volume fraction to the matrix. In addition, another mixture will be tested with recycled rubber particles content as a replacement of the fine aggregate by 7% and 15% with 10% of silica fume of the main cementitious material to counteract the effect of voids generated by this resilient material inside the concrete. Finally, once the mixture with the best performance against impacts it is chosen, among other characteristics, the application of the mixture has been made on a slab of a CrossFit box for future performance observations over impacts during its life and evaluate actual damage levels.

Key words: Steel-fiber, Rubber, Concrete, Sílica Fume, Slab, Ductility, Tenacity, CrossFit.

ÍNDICE

1. Introducción.....	14
1.1. Antecedentes	14
1.2. Justificación.....	15
1.3. Objetivos	16
1.4. Resultados Esperados.....	16
2. Desarrollo	18
2.1. Marco Teórico	18
2.1.1. Adición de fibras en la matriz del hormigón	18
2.1.2. Tipos de Fibras.....	23
2.1.3. Proceso de elaboración de mezcla de hormigón reforzado con fibras.....	25
2.1.4. Usos en la práctica	27
2.1.5. Adición de reciclado de caucho en la matriz del hormigón.....	28
2.2. Plan experimental.....	29
2.2.1. Diseño de mezclas.....	29
2.2.2. Ensayo de especímenes.....	34
2.3. Metodología	35
2.3.1. Proceso de Mezclado y preparación de especímenes	35
2.3.2. Ensayo de resistencia a cargas dinámicas.....	36
2.3.3. Caracterización visual del hormigón fresco.....	38
3. Resultados.....	39
3.1. Hormigón reforzado con fibras	39
3.1.1. Resistencia a la compresión	39
3.1.2. Resistencia a la tracción indirecta.....	40
3.1.3. Resistencia a impactos.	42
3.1.4. Caracterización Visual	43
3.2. Hormigón con partículas de caucho y Sílica Fume.....	44
3.2.1. Resistencia a la compresión	44
3.2.2. Resistencia a la tracción indirecta.....	46
3.2.3. Resistencia a impactos.	48
3.3. Módulo de elasticidad	50
3.4. Curvas Esfuerzo vs Deformación.....	51
3.4.1. Hormigón Reforzado con Fibras Ensayado a Compresión.....	51
3.4.2. Hormigón Reforzado con Fibras Ensayado a Tensión Indirecta	52
3.4.3. Hormigón con Partículas de Caucho y 0% de Sílica Fume Ensayado a Compresión.....	53

3.4.4.	Hormigón con Partículas de Caucho y 0% de Sílica Fume Ensayado Tensión Indirecta	54
3.4.5.	Hormigón con Partículas de Caucho y 10% de Sílica Fume Ensayado a Compresión.....	55
3.4.6.	Hormigón con Partículas de Caucho y 10% de Sílica Fume Ensayado Tensión Indirecta	56
3.5.	Curvas Esfuerzo vs Tiempo	57
3.5.1.	Hormigón Reforzado con Fibras Ensayado a Compresión.....	57
3.5.2.	Hormigón Reforzado con Fibras Ensayado a Tensión Indirecta	58
3.5.3.	Hormigón con Partículas de Caucho y 0% de Sílica Fume Ensayado a Compresión.....	59
3.5.4.	Hormigón con Partículas de Caucho y 0% de Sílica Fume Ensayado Tensión Indirecta	60
3.5.5.	Hormigón con Partículas de Caucho y 10% de Sílica Fume Ensayado a Compresión.....	61
3.5.6.	Hormigón con Partículas de Caucho y 10% de Sílica Fume Ensayado Tensión Indirecta	62
4.	Análisis de Resultados.....	63
4.1.	Hormigón Reforzado con fibras de acero	63
4.2.	Hormigón con partículas de Caucho y Sílica Fume	66
4.3.	Tipos de Falla.....	67
4.3.1.	Hormigón Reforzado con fibras de acero	67
4.3.2.	Hormigón con partículas de Caucho y Sílica Fume.....	70
4.4.	Costos.....	73
5.	Caso de aplicación.....	75
6.	Conclusiones y Recomendaciones.....	79
7.	Referencias	82
8.	Anexos.....	86
8.1.	Imágenes.....	86
8.2.	Gráficas	87
8.2.1.	desviaciones estándar Hormigón reforzado con fibras metálicas	87
8.2.2.	desviaciones estándar Hormigón con partículas de caucho y Sílica fume como cementante	88

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1: Recomendaciones de granulometrías para hormigón reforzado con fibras Fuente: ACI: 544.1R.....	20
Tabla 2: Granulometría Agregado Grueso.....	30
Tabla 3: Granulometría Agregado Fino.....	31
Tabla 4: Matriz Experimental para Hormigón Reforzado con Fibras de Acero.....	33
Tabla 5: Matriz Experimental para Hormigón con Partículas de Reciclado de Caucho	34
Tabla 6: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 7 Días	39
Tabla 7: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 28 Días ...	40
Tabla 8: Resistencia a la Tracción Indirecta Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 7 Días	40
Tabla 9: Resistencia a la Tracción Indirecta Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 28 Días	41
Tabla 10: Resistencia a Impactos a los 28 Días de Curado. Parámetro de Falla: Rotura	42
Tabla 11: Resistencia a Impactos a los 28 Días de Curado. Parámetro de Falla: 1 [cm] de Abrasión.....	42
Tabla 12: Tiempo de Compactación por Vibrado.....	43
Tabla 13: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 7 Días	44
Tabla 14: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 28 Días	45
Tabla 15: Resistencia a Tracción Indirecta Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 7 Días	46
Tabla 16: Resistencia a Tracción Indirecta Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 28 Días	47
Tabla 17: Resistencia a Impactos a los 28 Días de Curado. Parámetro de Falla: Rotura	48
Tabla 18: Módulos de Elasticidad de Mezclas Experimentales.....	50
Tabla 19: Costo de Mezcla de Hormigón Convencional por m ³	73
Tabla 20: Costo de Mezcla de Hormigón por m ³ Reforzado con 1% de Fibras w/c = 0.35	73
Tabla 21: Costo de Mezcla de Hormigón por m ³ con Reemplazo de Agregado Fino por 7% de Partículas de Caucho w/c = 0.40.....	74

LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Fuerza Tracción vs % de Fibras a Edad de 7 Días. Fuente: ELSEVIER Mahmoud et. al.....	21
Gráfico 2: Fuerza Compresión vs % de Fibras a Edad de 7 Días. Fuente: ELSEVIER Mahmoud et. al.....	21
Gráfico 3: Fuerza Impacto vs % de Fibras a) Primera grieta b) Fallo del material. Fuente: ELSEVIER Mahmoud et. al.	22
Gráfico 4: Curva Esfuerzo vs Deformación de hormigón reforzado con diferentes dosis de fibras. Fuente: EMB Construcción	23
Gráfico 5: Curva Granulométrico Agregado Grueso.....	30
Gráfico 6: Curva Granulométrica Agregado Fino	31
Gráfico 7: Curva Granulométrica Combinación de Agregados 60% Finos 40% Gruesos	32
Gráfico 8: Curva Granulométrica Partículas de Caucho.....	33
Gráfico 9: Plano sección trasversal aparato de ensayo ACI544.2R Modificado.....	37
Gráfico 10: Plano vista frontal de aparato de ensayo ACI544.2R modificado.....	37
Gráfico 11: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 7 Días	39
Gráfico 12: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 28 Días	40
Gráfico 13: Resistencia a la Tracción Indirecta Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 7 Días	41
Gráfico 14: Resistencia a la Tracción Indirecta Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 28 Días	41
Gráfico 15: Resistencia a Impactos a los 28 Días de Hormigón Reforzado con Fibras	42
Gráfico 16: Compactación por Vibrado w/c=0.35 - 1% Fibras	43
Gráfico 17: Compactación por Vibrado w/c=0.35 - 2% Fibras	43
Gráfico 18: Compactación por Vibrado w/c=0.40 - 1% Fibras	44
Gráfico 19: Compactación por Vibrado w/c=0.40 - 2% Fibras	44
Gráfico 20: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 7 Días	45
Gráfico 21: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 28 Días	46
Gráfico 22: Resistencia a Tracción Indirecta Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 7 Días	47

Gráfico 23: Resistencia a Tracción Indirecta Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 28 Días	48
Gráfico 24: Resistencia a Impactos 28 Días % Caucho - 0% Sílica Fume.....	49
Gráfico 25: Resistencia a Impactos 28 Días % Caucho - 10% Sílica Fume.....	49
Gráfico 26:Módulo de Elasticidad Hormigón Reforzado con Fibras	50
Gráfico 27: Módulo de Elasticidad Hormigón con % Caucho - 0% Sílica Fume	50
Gráfico 28: Módulo de Elasticidad Hormigón con % Caucho - 10% Sílica Fume	50
Gráfico 29: Curva Esfuerzo vs Deformación a Compresión Hormigón Reforzado con Fibras w/c=0.40	51
Gráfico 30: Curva Esfuerzo vs Deformación a Compresión Hormigón Reforzado con Fibras w/c=0.35	51
Gráfico 31: Curva Esfuerzo vs Deformación a Tracción Hormigón Reforzado con Fibras w/c=0.40	52
Gráfico 32: Curva Esfuerzo vs Deformación a Tracción Hormigón Reforzado con Fibras w/c=0.35	52
Gráfico 33: Curva Esfuerzo vs Deformación a Compresión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume w/c=0.40	53
Gráfico 34: Curva Esfuerzo vs Deformación a Compresión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume w/c=0.45	53
Gráfico 35: Curva Esfuerzo vs Deformación a Tensión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume w/c=0.40	54
Gráfico 36: Curva Esfuerzo vs Deformación a Tensión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume w/c=0.45	54
Gráfico 37: Curva Esfuerzo vs Deformación a Compresión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume w/c=0.40	55
Gráfico 38: Curva Esfuerzo vs Deformación a Compresión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume w/c=0.45	55
Gráfico 39: Curva Esfuerzo vs Deformación a Tensión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume w/c=0.40	56
Gráfico 40: Curva Esfuerzo vs Deformación a Tensión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume w/c=0.45	56
Gráfico 41: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Compresión Hormigón Reforzado con Fibras w/c=0.40	57

Gráfico 42: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Compresión Hormigón Reforzado con Fibras w/c=0.35	57
Gráfico 43: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Tensión Hormigón Reforzado con Fibras w/c=0.40	58
Gráfico 44: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Tensión Hormigón Reforzado con Fibras w/c=0.35	58
Gráfico 45: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Compresión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume w/c=0.40	59
Gráfico 46: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Compresión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume w/c=0.45	59
Gráfico 47: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Tensión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume w/c=0.40	60
Gráfico 48: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Tensión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume w/c=0.45	60
Gráfico 49: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Compresión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume w/c=0.40	61
Gráfico 50: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Compresión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume w/c=0.45	61
Gráfico 51: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Tensión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume w/c=0.40	62
Gráfico 52: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Tensión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume w/c=0.45	62
Gráfico 53: Costos de Materiales [\$/m ³]	75

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1: Control de Fisuras por Medio de Fibras. Fuente: EMB Construcción.....	19
Fotografía 2: Aparato de Ensayo construido y utilizado para ensayos	38
Fotografía 3: Falla dúctil con evidencia de fenómeno Pullout	64
Fotografía 4: 1 [cm] de Abrasión como Parámetro de Falla en Hormigón con Fibras.....	65
Fotografía 5: Hormigón Reforzado con Fibras Falla Tipo 4. ASTM C39.....	68
Fotografía 6: Hormigón Reforzado con Fibras Falla Tipo 4. ASTM C39.....	68
Fotografía 7: Hormigón Reforzado con Fibras Falla Tipo 4. ASTM C39.....	68
Fotografía 8: Hormigón Reforzado con Fibras Falla Tipo 4. ASTM C39.....	68
Fotografía 9: Falla Dúctil Hormigón Reforzado con Fibras	69
Fotografía 10: Falla Dúctil Hormigón Reforzado con Fibras	69
Fotografía 11: Falla Dúctil Hormigón Reforzado con Fibras	69
Fotografía 12: Falla Dúctil Hormigón Tradicional	69
Fotografía 13: Ensayo a Impacto Hormigón Tradicional	70
Fotografía 14: 1 [cm] de Abrasión como Parámetro de Falla en Hormigón con Fibras.....	70
Fotografía 15: Abrasión en Hormigón con Fibras Ensayo a Impacto	70
Fotografía 16: Abrasión en Hormigón con Fibras Ensayo a Impacto	70
Fotografía 17: Hormigón con Partículas de Caucho Falla Tipo Columnar ASTM C39	71
Fotografía 18: Hormigón con Partículas de Caucho Falla Tipo Columnar ASTM C39	71
Fotografía 19: Hormigón con Partículas de Caucho Falla Tipo Columnar ASTM C39	71
Fotografía 20: Hormigón con Partículas de Caucho Falla Tipo 3 ASTM C39	71
Fotografía 21: Hormigón Tradicional Ensayado a Tensión 0% Caucho	72
Fotografía 22: Hormigón Tradicional Ensayado a Tensión 7% Caucho	72
Fotografía 23: Hormigón Tradicional Ensayado a Tensión 15% Caucho	72
Fotografía 24: Hormigón con %Caucho Ensayado	72
Fotografía 25: Hormigón con %Caucho Ensayado	72
Fotografía 26: Hormigón con %Caucho Ensayado Falla: Rotura	72
Fotografía 27: Hormigón con %Caucho Ensayado Falla: Rotura	73
Fotografía 28: CrossFit Cumbayá, vista del piso de caucho de protección de 1’’	76
Fotografía 29: Hormigón afectado por el impacto de elementos pesados	76
Fotografía 30: Zona derrocada de 60x90x10 [cm] con material de mejoramiento listo para recibir fundición de hormigón	77
Fotografía 31: Materiales usados para la fundición InSitu	77

Fotografía 32: Hormigón fundido InSitu	77
Fotografía 33: Hormigón con acabado realizado	78
Fotografía 34: Proceso de curado mediante el riego de agua	78
Fotografía 35: Hormigón reforzado con 1% de fibras y $w/c = 0.35$ vs hormigón tradicional en zonas aledañas.....	78

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El uso del hormigón como material de construcción de obras civiles data desde los albores de la historia. Ha sido utilizado en múltiples estructuras debido a su facilidad de puesta en obra (maleabilidad), cumpliendo con su función de mantener edificaciones en pie una vez endurecido. Con el paso del tiempo, junto con el avance de nuevas tecnologías, el hormigón ha ido evolucionando para aumentar su resistencia ante solicitaciones de carga, soportar condiciones ambientales extremas, mejorar calidad de materiales, etc. mediante aditivos que pueden ser integrados a la matriz del material.

Para garantizar la calidad del hormigón, actualmente existen normas desarrolladas junto con investigaciones realizadas por entidades internacionales como el ACI (American Concrete Institute), ASTM (American Society for Testing and Materials), entre otros, que dan pauta para el diseño de mezclas asegurando un correcto balance y combinación de los materiales que constituyen el mismo para el uso requerido.

El principal problema que se ha ido haciendo evidente a lo largo de su uso es la escasa resistencia a esfuerzos de tracción que produce el fallo del material, por lo que distintas soluciones han surgido como el refuerzo interno con varillas de acero longitudinal y transversal para cargas estáticas, que han ayudado a aumentar considerablemente la resistencia del hormigón a la tracción. Pero, bajo acción de cargas dinámicas como impactos, el material sigue siendo muy frágil, por lo que se ha planteado realizar la investigación de mezclas óptimas de hormigón con el uso de fibras metálicas para aumentar su capacidad de resistencia a este tipo de eventos, siguiendo lineamientos propuestos por el ACI 544, entre otras normas, para la realización de especímenes, ensayos y comparaciones de porcentajes de fibras en la matriz del

hormigón propuestos. Además, como alternativa se probará el uso de reciclado de caucho como reemplazo del agregado fino para medir posibles mejoras de las propiedades ante impacto.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La importancia de lograr que el hormigón tenga una considerable resistencia a impacto mediante el uso de fibras metálicas incorporadas o reciclado de caucho es evitar el deterioro acelerado del material que puede llevar a varias complicaciones en el funcionamiento del elemento del cual conforma una unidad. Además, se busca mejorar su capacidad de resistencia de esfuerzos de tracción ya que es otro factor que influye para soportar estas condiciones de carga.

CrossFit es reconocido como un deporte de alto rendimiento a nivel mundial, el tipo de entrenamiento que se lleva a cabo depende del uso de múltiples objetos de pesos considerables que son arrojados constantemente desde altura sobre el piso hormigón. Debido a esto, la losa de contrapiso existente en cada gimnasio de CrossFit se encuentra sometido a constantes fuerzas de impacto diariamente, por lo que las reparaciones son muy frecuentes por el deterioro acelerado y la gran mayoría de veces no son muy duraderas, generando incomodidad tanto en los usuarios como en los dueños por los gastos que implica el reemplazo del material. La presente investigación surge con la intención de dar una posible solución a este problema que aqueja a todos los centros que practican este deporte, tratando de lograr un mayor desempeño del hormigón a largo plazo ante estas solicitudes de carga dinámica.

La investigación llevada a cabo toma en cuenta parámetros de comparación entre las diferentes dosificaciones como: inspección visual de propiedades de la mezcla fresca, resistencia a la compresión, resistencia a la tensión, resistencia a la abrasión, capacidad de soportar impactos, deformaciones, fisuramiento, ductilidad y falla del material. Además, junto

con un análisis de costo/beneficio, se escogerá una dosificación óptima para los objetivos propuestos.

Para la evaluación y medición de dichas mejoras, se basará en la norma ACI 544 - 2R “*Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*” junto con las normas ASTM para seguir un mismo procedimiento tanto de mezclado como de ensayo de especímenes de cada dosificación planteada que se cree pueda aumentar la capacidad del material y evitar variaciones en los resultados. De igual manera para ensayos en mezclas con reciclado de caucho incorporado se realizarán metodologías similares para estandarizar resultados los cuales evaluarán un número de golpes resistidos y profundidad de abrasión en el hormigón entre los materiales añadidos a la matriz.

1.3. OBJETIVOS

Los objetivos propuestos del trabajo de titulación son los siguientes:

- Desarrollar un diseño de mezcla de hormigón con características que mejoren el desempeño ante impactos.
- Evaluar diferentes dosificaciones de mezcla empleando diferentes materiales cementantes, fibras metálicas, aditivos y polvo de caucho para mejorar las características frente a cargas dinámicas.
- Realizar una comparación de los resultados encontrados, determinar la mejor alternativa de desempeño y analizar el factor económico.
- Realizar una muestra a escala del diseño propuesto y uno tradicional para simular el impacto que sufre una losa de contrapiso de hormigón.

1.4. RESULTADOS ESPERADOS

Del trabajo de investigación se esperan los siguientes resultados:

- Obtener dosificaciones de mezcla óptimas que demuestren un mejor desempeño frente a solicitaciones de impacto manteniendo la integridad o resistencia.
- Identificar los beneficios o desventajas de incorporar fibras metálicas en la matriz del hormigón.
- Verificar los beneficios o desventajas de incorporar partículas de caucho reciclado como alternativa de reemplazo parcial de agregado fino.
- Cotejar los resultados obtenidos en el laboratorio en contraste con una muestra real del uso para el cual se está realizando el diseño de mezcla.
- Conocer las implicaciones económicas y análisis de costo/beneficio de las mejores alternativas encontradas.

2. DESARROLLO

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. ADICIÓN DE FIBRAS EN LA MATRIZ DEL HORMIGÓN

El hormigón tiene la característica de soportar cargas de considerable magnitud en compresión estática, pero es considerado como un material frágil ante impactos (cargas dinámicas) debido en parte a la muy baja resistencia a la tracción que posee el material, poca ductilidad (por fatiga), y por naturaleza, su absorción de energía ante impactos también es reducida (tenacidad). Una solución que se puede realizar en el hormigón para aumentar su tenacidad y resistencia ante el daño producido es la adición de fibras dentro de la matriz del hormigón, aumentando así su capacidad de absorber energía y dándole una estructura más dúctil, propiedad que permite la redistribución de esfuerzo y da indicios de falla, pero manteniendo su integridad aun cuando se ha deformado en el rango inelástico (Aylie et al, 2015). El hormigón puede llegar a tener una mayor capacidad de deformación debido a que las fibras evitan que las fisuras se prolonguen o existan grietas por contracción actuando como refuerzos dispersados de manera aleatoria.

Antiguamente para reforzar internamente el hormigón, se utilizaban pelajes de animales como la crin de caballo en los morteros y paja para los ladrillos de barro. También, se usaba fibra de amianto (asbesto) conocido por ser nocivo para la salud por lo que dejó de ser implementado. En la actualidad, se reemplazaron estos materiales por fibras de acero, fibras de vidrio y fibras sintéticas, siendo estas últimas las más económicas para su uso en obra.



Fotografía 1: Control de Fisuras por Medio de Fibras. Fuente: EMB Construcción

Estas fibras implementadas en el hormigón reducen la formación de micro fisuras en el proceso de fraguado, proceso causante fisuras de retracción posterior (shrinkage). Al agrietarse, el hormigón produce primero micro fisuras, que en gran cantidad se combinan hasta formar fisuras considerables y una vez sometido a cargas estas se propagan rápidamente ocasionando el fallo del material (ACI 544.21R, 1996). Las fibras evitan que las micro fisuras se prolonguen interfiriendo su paso, y evitan también “expansión” en el hormigón (fuerzas de tensión interna) actuando como pequeñas “varillas de refuerzo” que ayudan a soportar tracción. Si el módulo de elasticidad de la fibra es más alto que la mezcla de hormigón o mortero, las fibras ayudan a soportar la carga mediante el aumento de la resistencia a la tracción del material (ACI 544.4R, 1988). En hormigones endurecidos produce un aumento de la resistencia al impacto y puede mejorar el comportamiento del hormigón frente a la abrasión. Otra propiedad de estas fibras es el reducir el daño por congelamiento debido a la contracción y control de fisuración.

El contenido de fibras es expresado como una fracción del volumen total de la dosificación escogida y las cantidades varían dependiendo del tipo de fibras que vaya a emplearse. En una mezcla es necesario tener en cuenta solo los límites cuantitativos de las fibras y métodos de mezclado dados por normas como el ACI o la ASTM, debido a que no afectan la dosificación y puede implementarse fácilmente. Se han detallado buenos resultados con relaciones w/c de 0.35 a 0.45, la adición de cementantes como micro sílice (silica fume) o fly ash aumentan la resistencia a la compresión y una relación de aspecto (L / D) mayores a 50, la cual se calcula dividiendo la longitud de fibra (L) por su diámetro real o aproximado (D). La

relación de aspecto juega un papel fundamental ya que a mayor longitud de la fibra existirá un mayor anclaje en el hormigón evitando que estas se deslicen antes de producirse el desarrollo de esfuerzos, pero puede producir efectos adversos.

Al agregar fibras en la mezcla de hormigón, se produce una reducción en la capacidad de compactación el material (Eren et. al., 2000), por lo que es necesario la vibración o un aditivo plastificante que ayude a la trabajabilidad. Un factor que influye al momento de realizar la mezcla de hormigón es el aglomerado de fibras o “Fiber Balling” (Anexo 1) que se produce por el porcentaje adicionado, L/D demasiado grandes y al ser añadidas de manera rápida a la mezcla, causando que estas se amontonen o concentren en un solo punto evitando que se dispersen de manera homogénea. Este fenómeno puede evitarse colocando las fibras al final del proceso de mezclado y de manera progresiva, cuidando también que el tamaño nominal del agregado no interfiera en la dispersión de fibras. Cabe recalcar que debería evitarse el introducir algún artefacto para producir la compactación del hormigón, debido a que las fibras tenderían a alinearse de forma preferencial eliminando la distribución uniforme de las fibras en el entorno fresco del hormigón (ACI 544.2R, 1989) volviéndolo un factor aún menos controlable. Aunque la vibración externa también produce cierto alineamiento de las fibras este tiene menor influencia en resultados finales.

Tabla 1: Recomendaciones de granulometrías para hormigón reforzado con fibras Fuente: ACI: 544.1R

U. S. standard sieve size	Percent Passing for Maximum Size of				
	$\frac{3}{8}$ in. (10 mm)	$\frac{1}{2}$ in. (13 mm)	$\frac{3}{4}$ in. (19 mm)	1 in. (25 mm)	$1\frac{1}{2}$ in. (38 mm)
2 (51 mm)	100	100	100	100	100
$1\frac{1}{2}$ (38 mm)	100	100	100	100	85-100
1 (25 mm)	100	100	100	94-100	65-85
$\frac{3}{4}$ (19 mm)	100	100	94-100	76-82	58-77
$\frac{1}{2}$ (13 mm)	100	93-100	70-88	65-76	50-68
$\frac{3}{8}$ (10 mm)	96-100	85-96	61-73	56-66	46-58
#4 (5 mm)	72-84	58-78	48-56	45-53	38-50
#8 (2.4 mm)	46-57	41-53	40-47	36-44	29-43
#16 (1.1 mm)	34-44	32-42	32-40	29-38	21-34
#30 (600 μ m)	22-33	19-30	20-32	19-28	13-27
#50 (300 μ m)	10-18	8-15	10-20	8-20	7-19
#100 (150 μ m)	2-7	1-5	3-9	2-8	2-8
#200 (75 μ m)	0-2	0-2	0-2	0-2	0-2

A medida que se aumenta el contenido de fibras en la matriz, la resistencia a la compresión también aumenta, por las propiedades descritas. Para los experimentos realizados por Mahmoud en un artículo publicado en ELSEVIER “*The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete*”, es posible notar a los 7 días un aumento de resistencia a compresión (*figura 1*) y tensión (*figura 2*) óptima con relación $w/c=0.36$, micro sílice y de 0.3% a 0.5% de contenido de fibras. También demuestra un aumento en contraste con especímenes de referencia (composición tradicional sin fibras) en resistencia a ensayos con esta combinación.

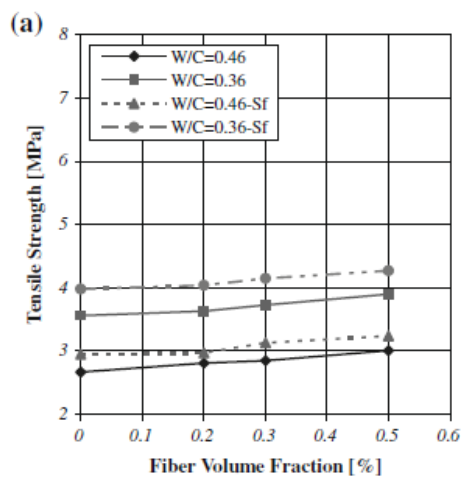


Gráfico 1: Fuerza Tracción vs % de Fibras a Edad de 7 Días. Fuente: ELSEVIER Mahmoud et. al.

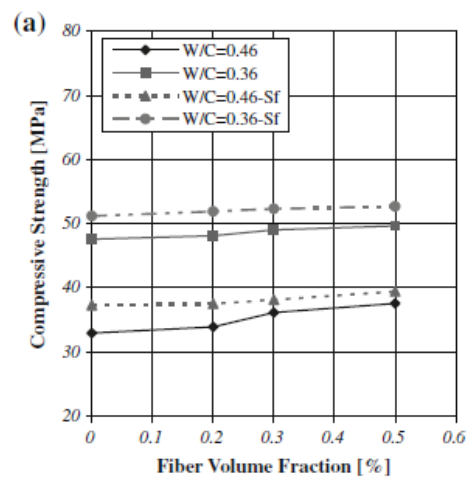


Gráfico 2: Fuerza Compresión vs % de Fibras a Edad de 7 Días. Fuente: ELSEVIER Mahmoud et. al.

Para la resistencia a impactos, se muestra que las fibras ayudan a retardar la falla del material obteniendo resultados favorables. La combinación óptima presenta las primeras fisuras después de varios golpes a comparación del hormigón tradicional, igualmente su la falla del material se produce mucho después.

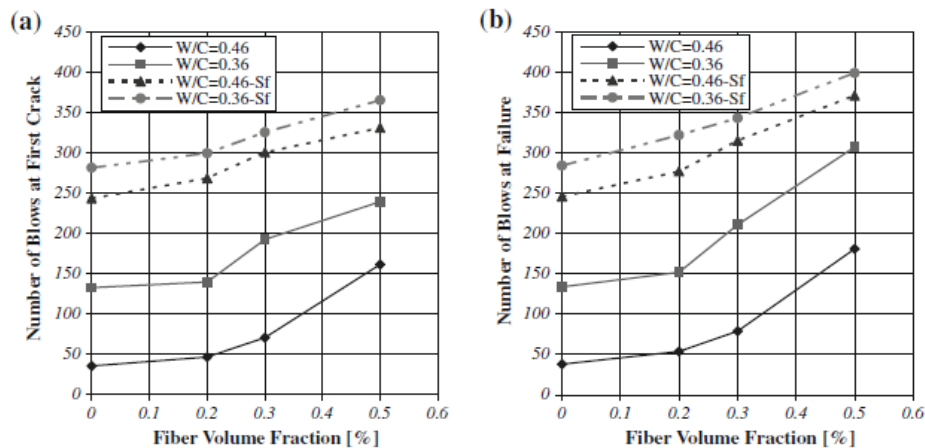


Gráfico 3: Fuerza Impacto vs % de Fibras a) Primera grieta b) Fallo del material. Fuente: ELSEVIER Mahmoud et. al.

En otros ensayos realizados por Zhanga et.al. (*Resistance of high-strength concrete to projectile impact*) en hormigones de alta resistencia, se puede observar que la resistencia a impactos aumenta con el incremento de resistencia a la compresión, pero también aumenta su fragilidad. La adición de fibras, como se ha mencionado antes, tiende a detener las grietas internas evitando la propagación y minimizando el área de daño visible (confinando el daño en una zona localizada) que puede ser tomado como parámetro para determinar la falla del material.

Se observó también que la grava en hormigón era eficaz en evitar la perforación de especímenes (la falta de árido grueso es perjudicial). Por lo tanto, se sugiere que una matriz con grava y fibras podría proporcionar una solución óptima para reducir el daño general debido a que el agregado es el componente más resistente de la matriz de hormigón, pero a la vez su zona de transición es muy débil, mientras más grande sea el agregado, más facilidad de planos de falla existen en el hormigón. Cabe señalar que el largo de fibra es condicionado por el tamaño máximo del árido grueso, que para un refuerzo eficiente no debe sobrepasar los 2/3 de longitud de la fibra (Consuelo, 2005). El tamaño nominal del agregado no debe ser tan grande, debido a que influye en la distribución de fibras en la matriz del hormigón (Anexo 2). ACI 544.1R da recomendaciones de granulometría para hormigón reforzado con fibras (Tabla 1).

2.1.2. TIPOS DE FIBRAS

Frente a esfuerzos dinámicos, la resistencia a impactos parece ser dependiente del tipo de fibras usadas. Las fibras sintéticas de polipropileno son más eficientes en la absorción de energía que las fibras de acero. Pero, las fibras de acero son más eficientes resistiendo altas caídas de impacto que las fibras sintéticas, el esfuerzo producido por el impacto es absorbido de forma más óptima (Zhang, 2008).

Para distintas dosificaciones y usos del hormigón en la industria, el porcentaje de volumen de fibra en la mezcla, (fracción de volumen) se puede clasificar como:

Fracción de bajo volumen (<1%): reducir el agrietamiento por contracción. Se usan en losas y pavimentos que tienen grandes superficies expuestas grietas de contracción

Fracción de volumen moderada (entre 1 y 2%): aumenta el módulo de rotura, tenacidad, y resistencia al impacto.

Fracción de alto volumen (mayor de% 2): ayudan al endurecimiento por deformación de los materiales compuestos.

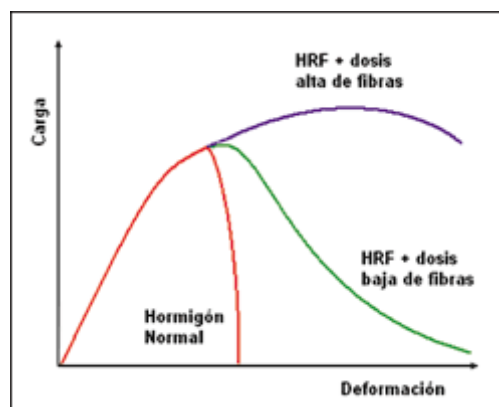


Gráfico 4: Curva Esfuerzo vs Deformación de hormigón reforzado con diferentes dosis de fibras. Fuente: EMB Construcción

Con bajos contenidos en fibra, la tenacidad y el índice de tenacidad de los morteros no se ve afectado. Con contenidos superiores al 1% del volumen total se produce un incremento en los valores de tenacidad (PUERTAS et.al., 2000). Para valores bajo el 1% en volumen, el comportamiento todavía está dominado por la matriz del hormigón (Rodríguez de Sensale et. al., 2017).

2.1.2.1. FIBRAS DE POLIPROPILENO, VIDRIO Y NYLON

Estas fibras son usadas para prevenir la fisuración del hormigón en estado fresco o durante edades tempranas debido a la retracción plástica. Están diseñados para ser resistentes al entorno altamente alcalino de la pasta de hormigón y son estables al calor. Normalmente se usan porcentajes en volumen de alrededor de 5%

Las fibras de vidrio tienen flexibilidad y resistencia que aumentan conforme disminuye el diámetro. La fibra de vidrio contiene óxido de zirconio que le proporciona una excepcional capacidad de resistencia química a medios alcalinos, mayor resistencia a la tracción y alto módulo de elasticidad que caracteriza a la generalidad de las fibras de vidrio, pero inevitable a la corrosión (Criado, 2005) por lo que solo se usan en prefabricados para evitar la reacción con álcalis del cemento en obra. Esta clase de fibras son hidrofílicas, absorben entre 4% y 5% de humedad, lo que permite maximizar la hidratación de las partículas de cemento en su entorno dándole adherencia a la matriz de hormigón y mortero (fusión con la matriz de hormigón).

2.1.2.2. FIBRAS DE ACERO

Las fibras acero pueden ser fabricadas de diferentes tamaños, secciones, rugosidad superficial y formas. Normalmente tienen deformaciones (corrugados) a lo largo de la fibra o en sus extremos para aumentar la adherencia en el hormigón. Se pueden comparar las fibras mediante su resistencia a la tracción y la relación de aspecto. Las dosificaciones de fibras de acero varían normalmente entre 0.25 a 2.00 % del volumen total afectando ligeramente la

resistencia a la compresión en un aumento del 15 % a partir del 1.5% de volumen total de fibras (ACI 544.1R, 1996).

El añadir fibras de acero en la matriz del hormigón, al ser ensayado en flexo tracción, aumentan la tenacidad y producen una rotura dúctil actuando como refuerzo interno. Este tipo de fibras son principalmente funcionales después de la formación de grietas.

2.1.2.3. FIBRAS SINTÉTICAS

Las fibras sintéticas están clasificadas dentro del grupo de las macro fibras y son resultado de investigaciones y desarrollo de industrial petroquímicas y textiles. Su efecto es asegurar una tenacidad acorde con las necesidades del diseño estructural. Están diseñadas para mejorar las características mecánicas del hormigón y existen en longitudes y diámetros distintos. La proporción de la mezcla depende de la longitud y el diámetro, pero las dosificaciones usualmente empleadas varían entre 0,1 y 0,3% en volumen.

Al comparar las distintas fibras existentes, la fibra de vidrio y de polipropileno presentan mayor cantidad de ventajas en el hormigón, sin embargo, la fibra de vidrio tiene mayor influencia en el aumento de la resistencia a flexo tracción en el hormigón a comparación de la fibra de polipropileno. Desde este punto de vista la fibra de vidrio es superior.

La fibra de acero presenta propiedades similares en el hormigón a las que presenta la fibra de polipropileno, sin embargo, el peso propio y la dificultad de la puesta en obra es un punto negativo. Desde este punto de vista la fibra de polipropileno es superior (Muñoz, 2011).

2.1.3. PROCESO DE ELABORACIÓN DE MEZCLA DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

Para el proceso de combinación de los componentes para formar la matriz de hormigón no es necesario un cambio significativo en las especificaciones y orden de mezclado de los

materiales como se especifica en la norma ASTM C192 sección 7.1.2 en concretera. Sin embargo, se requiere mucho cuidado durante el mezclado, la colocación y el acabado, a fin de evitar el desarrollo de aglomerados de fibras, la adición de agua al hormigón en el lugar y la posibilidad de fibras visibles en la superficie del hormigón.

Cuando se produce hormigón en pequeñas cantidades es común poner la fibra directamente en la concretera sin necesidad de sistema especial de alimentación de fibra. Con fibras sintéticas, es muy importante que se mezclen y homogenicen por lo menos de tres a cinco minutos con toda la pasta de cemento, algo que no siempre es posible en el lugar de la obra. La agitación mecánica apropiada asegura la separación de las fibras, eliminando virtualmente la formación de bolas de fibras en el hormigón (distribución completa y uniforme en toda la mezcla). Para esta investigación se realizará la colocación de fibras al final del proceso de mezclado en forma controlada y se optará por la vibración externa de los especímenes de hormigón.

Colocación: Al agregar pequeños volúmenes de fibras de cualquier tipo se reduce el revenimiento, haciendo que el hormigón tenga un aspecto más rígido y menos trabajable. Si se desea mejor trabajabilidad, se debe ajustar la granulometría del agregado y poner un plastificante de mediano o alto rango, siempre evitando la adición agua.

Acabado: La vibración externa hace que la pasta salga a la superficie y cubra las fibras localizadas en la superficie del espécimen, encapsulándolas en el hormigón y minimizando la exposición de las fibras. Si la vibración externa no fuera posible, debe dejarse en la superficie una capa de mortero que sea lo suficientemente gruesa para cubrir las fibras.

Periodo de espera: En el caso de las fibras sintéticas en el hormigón, estas bloquean o retardan la aparición del sangrado en la superficie. El hormigón puede aparentar un estado

sólido (fraguado inicial o flash set), pero puede estar en estado fresco, por lo que se debe esperar un poco más de tiempo en comparación con el hormigón tradicional.

Puesto que se usan menos fibras de acero (por volumen) en el hormigón, el sangrado no se retrasa y el tiempo necesario para el acabado del hormigón reforzado con fibras de acero es el mismo que el hormigón tradicional. El comité del ACI 544 (Referencia 1) recomienda tomar las siguientes precauciones en el mezclado de hormigón con fibras:

- Permitir que el ingeniero del proyecto revise y apruebe el equipo y método utilizado para agregar las fibras a la mezcla.
- Efectuar una prueba a gran escala, al menos ocho días antes de la primera colocación para ver el comportamiento.
- No permitir que las fibras se apilen o se deslicen hacia abajo de las espas de un tambor parcialmente lleno.
- No usar equipo con las espas de mezclado desgastadas donde puedan quedarse las fibras.

El tiempo de curado que debe realizarse es el mismo que para hormigones y morteros tradicionales sumergidos en agua saturada con hidróxido de calcio a $23^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$ por mínimo 7 días para obtener la máxima resistencia.

2.1.4. USOS EN LA PRÁCTICA

El uso de fibras en campo es muy variado, normalmente estas se usan como refuerzo adicional al diseño del hormigón armado debido a que es un parámetro totalmente incontrolable y muy variable en términos de distribución. El ACI no menciona ningún apartado para el diseño específico de estructuras de sollicitación de cargas de gran importancia, por lo que es más

común encontrar estos refuerzos en losas de contrapiso. El uso de fibras como reemplazo de acero de refuerzo es posible en obras que no necesiten especial función en su vida útil, ya que actúan como refuerzos internos del hormigón evitando que fisuras se prolonguen o las mismas se produzcan aumentando la fuerza a la tracción del hormigón. Existen investigaciones que aseguran el uso alternativo de fibras reemplazando a la malla electrosoldada o varillas de refuerzo, pero no es del todo cierto. Se puede complementar el uso de acero de refuerzo con la adición de fibras para un mayor desempeño debido al confinamiento del hormigón (Aylie H., Okiyarta A. & A., 2015).

2.1.5. ADICIÓN DE RECICLADO DE CAUCHO EN LA MATRIZ DEL HORMIGÓN

Otro tipo de material que se puede usar en el hormigón para retardar la propagación de fisuras son las partículas de caucho. Esta metodología propone el reemplazo del agregado fino por las partículas de caucho en porcentajes del 5 al 20% en volumen para absorción de impactos (energía), con un tamaño nominal de 4.75 mm o menor. Sin embargo, esto tiene efectos negativos en las propiedades frescas del hormigón y resistencia a la compresión, que es producto de la poca adherencia a la pasta de cemento a las partículas de caucho (Mohamed et.al., 2016), efecto similar al obtener espacios vacíos dentro de la matriz del hormigón.

Este fenómeno de reducción de resistencia a la compresión es ocasionado por la capacidad de deformación de las partículas de caucho. Aun cuando este material es de gran importancia en el desempeño frente a cargas dinámicas por su alta naturaleza resiliente, el material de su alrededor no lo es, por lo que las fisuras se inician rápidamente en los alrededores de las partículas de caucho lo que acelera el proceso de falla (Najib N. et. al., 2018).

Por otro lado, con estas características negativas, esta combinación de materiales tiene propiedades como densidad baja, una alta tenacidad, y de gran importancia para esta investigación, alta resistencia a al impacto comparada con el hormigón convencional. Uno de los propósitos de la investigación, es el revertir la disminución de la resistencia a la compresión conforme el porcentaje de reciclado de caucho aumenta mediante el uso de micro sílice como cementante, ya que entre sus propiedades está el aumento de resistencia a la compresión y cierto porcentaje aumento de resistencia a la tensión.

2.2. PLAN EXPERIMENTAL

2.2.1. DISEÑO DE MEZCLAS

Para poder evaluar las propiedades de resistencia a impactos de los materiales ya mencionados al ser adicionados a la matriz del hormigón, este trabajo de investigación propone distintas dosificaciones variando el porcentaje de fibras introducidas, el porcentaje de caucho reemplazando agregado fino, cantidad de micro sílice usado como cementante, plastificante para ayudar a la trabajabilidad y las relaciones w/c obtenidas por el método volumétrico para un mayor control de cantidades por [m³].

2.2.1.1. PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

Para realizar las dosificaciones es necesario caracterizar el agregado para utilizar el método volumétrico obteniendo, la granulometría, el porcentaje de absorción, el tamaño nominal, humedad, etc. Para el presente trabajo de investigación, se usó el agregado existente en el laboratorio de ICV de la Universidad San Francisco de Quito proveniente de la cantera de Pifo distribuido por Holcim.

2.2.1.1.1. AGREGADO GRUESO

Siguiendo las especificaciones de la norma ASTM C33 para caracterizar el agregado grueso se puede obtener la granulometría del material mediante el tamizado y la clasificación

del tipo de piedra al ajustar la curva granulométrica obtenida a los límites que estipula la norma. Además, basándose en la ASTM C127, se obtuvieron los valores de porcentaje de absorción del agregado, junto con la densidad del agregado grueso y el contenido de humedad del material almacenado especificado en la norma ASTM C566.

Tabla 2: Granulometría Agregado Grueso

Agregado Grueso P7					
Tamiz ASTM	Abertura [mm]	Peso Retenido [g]	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Pasa
1/2"	12,500	0,00	0,000	0,000	100,00
3/8"	9,500	795,00	39,836	39,836	60,16
#4	4,750	1164,50	58,350	98,186	1,81
#8	2,360	30,00	1,503	99,689	0,31
#16	1,180	1,50	0,075	99,764	0,24
#30	0,600	0,50	0,025	99,790	0,21
#50	0,300	0,50	0,025	99,815	0,19
#100	0,150	1,00	0,050	99,865	0,14
#200	0,075	0,50	0,025	99,890	0,11
Base	-	0,50	0,025	99,915	0,09
Total [g]		1994,00			

% Humedad Agg G	0,20
W Natural [g]	500
W Seco [g]	499
W Muestra Seca [g]	1995,7
% Pérdida Tamizado	0,09
Módulo de finura	5,97

% Pasante 1/2 retenido en 3/8	18,33
% Pasante 3/8 retenido en #4	11,88
Densidad [gr/cm3]	2,43
Absorción [%]	4,63

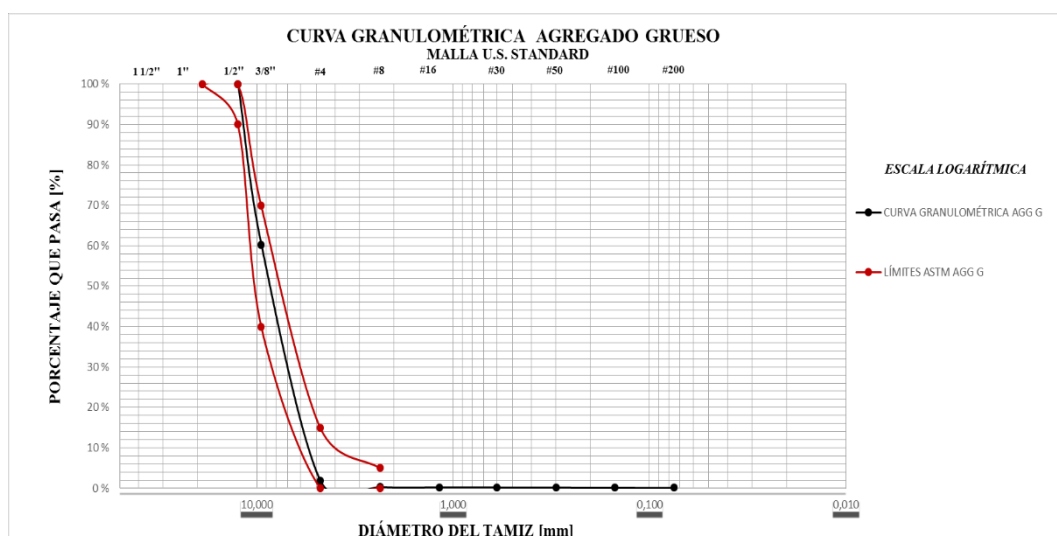


Gráfico 5: Curva Granulométrico Agregado Grueso

2.2.1.1.2. AGREGADO FINO

Para la caracterización del agregado fino se realizaron los mismos ensayos, pero basados en las normas ASTM C136 para el análisis granulométrico para agregado fino, ASTM C128 para densidad del agregado y porcentaje de absorción.

Tabla 3: Granulometría Agregado Fino

Agregado Fino P9					
Tamiz ASTM	Abertura [mm]	Peso Retenido [g]	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% Pasa
1/2"	12,500	0,00	0,000	0,000	100,00
3/8"	9,500	0,00	0,000	0,000	100,00
#4	4,750	2,50	0,506	0,506	99,49
#8	2,360	247,50	50,051	50,556	49,44
#16	1,180	215,50	43,579	94,135	5,86
#30	0,600	22,00	4,449	98,584	1,42
#50	0,300	2,50	0,506	99,090	0,91
#100	0,150	1,00	0,202	99,292	0,71
#200	0,075	1,50	0,303	99,596	0,40
Base	-	1,00	0,202	99,798	0,20
Total [g]		493,50			

% Humedad Agg F	1,11
W Natural [g]	500
W Seco [g]	494,5
W Muestra Seca [g]	494,5
% Pérdida Tamizado	0,20
Módulo de finura	4,42

% Pasante 1/2 retenido en 3/8	18,33
% Pasante 3/8 retenido en #4	11,88
Densidad [gr/cm3]	2,49
Absorción [%]	1,21

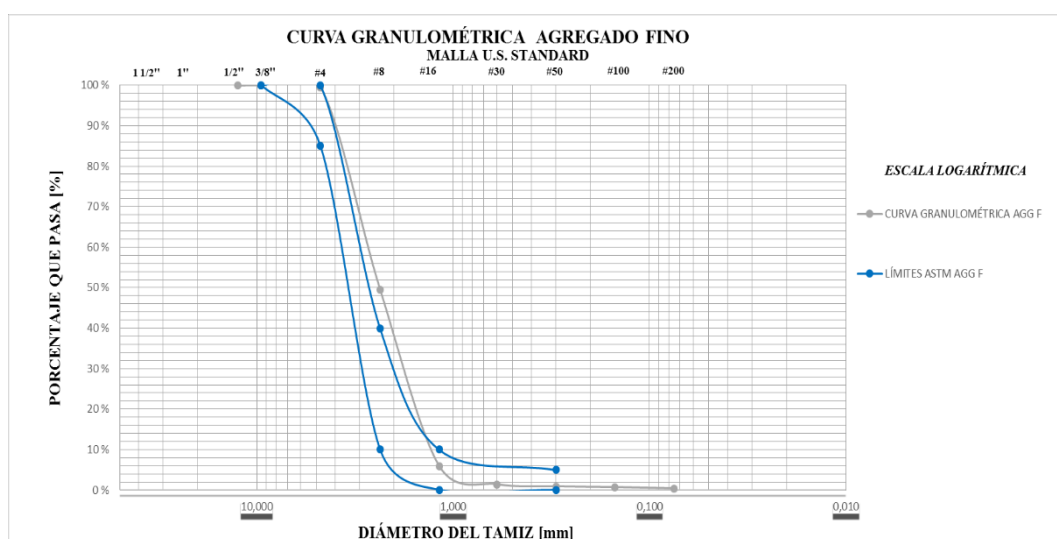


Gráfico 6: Curva Granulométrica Agregado Fino

2.2.1.1.3. COMBINACIÓN DE AGREGADOS

Para la dosificación se optó por usar el 40% de agregado grueso y el 60 % de agregado fino para poder lograr una curva granulométrica lo más uniforme posible, con una relación de $\text{Agg}/\text{C} = 2$.

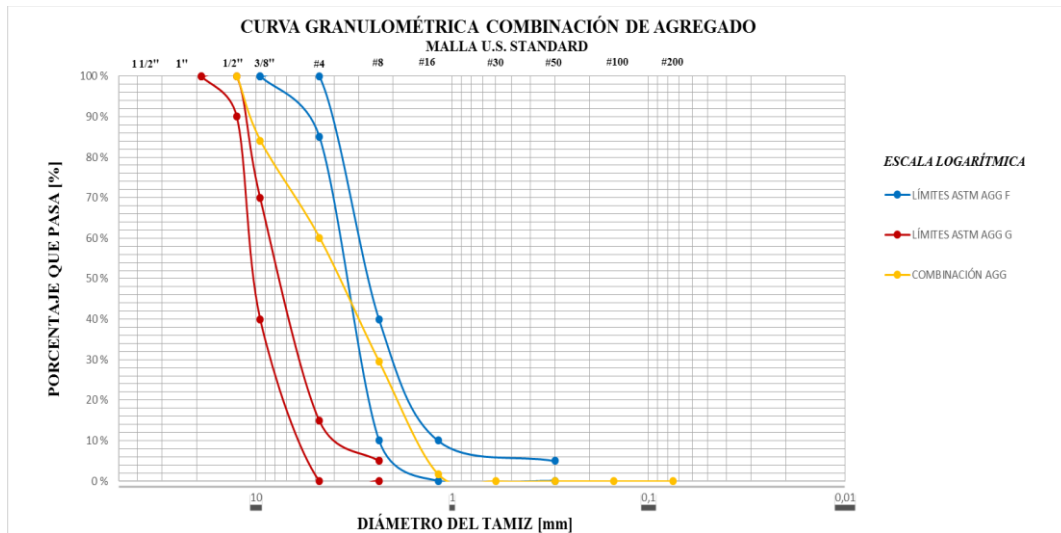


Gráfico 7: Curva Granulométrica Combinación de Agregados 60% Finos 40% Gruesos

2.2.1.2. FIBRAS METÁLICAS

Las fibras metálicas Dramix 3D usadas como refuerzo interno del hormigón son distribuidas por BEKAERT conforme a la norma ASTM A820. Estas fibras tienen una relación de aspecto L/D de 60-80 de rendimiento. La resistencia a la tracción de las fibras es de 1225 $[\text{N}/\text{mm}^2]$ y con una geometría que le permite evitar ser arrancada de la matriz del hormigón debido a esfuerzo de tracción.

2.2.1.3. RECICLADO DE CAUCHO

Las partículas de caucho usado en la presente investigación provienen de la planta recicladora Rubber Action. Es una de las 30 empresas registradas por la Subsecretaría de Calidad Ambiental para la gestión, tratamiento y reciclaje de neumáticos en el Ecuador, ubicada una zona rural asentada en el kilómetro 38 de la carretera E35 (El Comercio, 2019).

Se dispone de dos tipos de partículas de reciclado de caucho, con tamaños máximos nominales de 2.35 mm (#8) como material grueso y 0.6 mm (#30) como material fino.

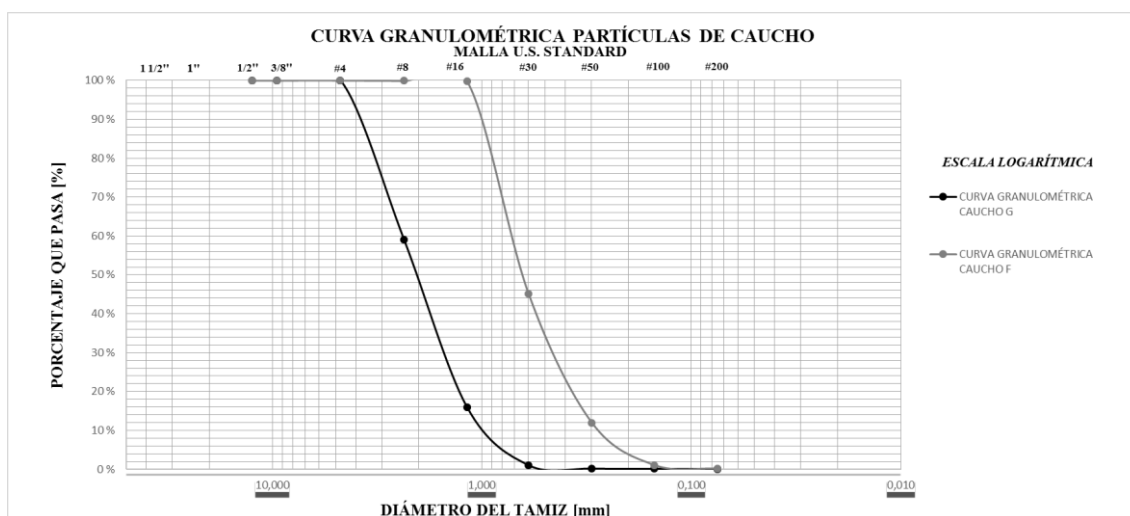


Gráfico 8: Curva Granulométrica Partículas de Caucho

Para la dosificación de hormigón resistente a impactos, los porcentajes de reemplazo de agregado fino por partículas de caucho serán de 7% y 15%, utilizando un 65% de material fino y un 35% de material grueso, tratando de contrarrestar el efecto de vacíos en la mezcla una vez fraguada.

2.2.1.4. MATRICES EXPERIMENTALES

Este tipo de hormigón que será investigado en el presente trabajo de titulación tiene porcentajes de fibras metálicas de refuerzo calculadas en base a 1 [m³] de mezcla que puede ser extrapolado para un volumen menor cocidiendo el volumen total de la mezcla a realizar.

Tabla 4: Matriz Experimental para Hormigón Reforzado con Fibras de Acero

Nº	f'c Esperado [Mpa]	Cemento [Kg]	Agua [Kg]	Agg Grueso [Kg]	Agg Fino [Kg]	Adx [Kg]	W/C	% Fibras	Fibras [kg]	Peso T [kg]
1		618,04	245,15	517,32	750,62	4,33		0,00%	0,00	2135,46
2	40	618,04	245,15	517,32	750,62	4,33	0,35	1,00%	79,00	2213,96
3		618,04	245,15	517,32	750,62	4,33		2,00%	157,00	2292,46
4		568,61	257,70	523,54	759,64	2,84		0,00%	0,00	2112,33
5	35	568,61	257,70	523,54	759,64	2,84	0,40	1,00%	79,00	2190,83
6		568,61	257,70	523,54	759,64	2,84		2,00%	157,00	2269,33

El otro tipo de hormigón, del cual será investigadas sus propiedades, consta de partículas de reciclado de caucho en su matriz, cantidad que es calculada como un porcentaje de reemplazo del agregado fino. Además, con el objetivo de conocer los beneficios de la Sílica fume se adiciona un 10% en combinación con el cementante principal.

Tabla 5: Matriz Experimental para Hormigón con Partículas de Reciclado de Caucho

N°	f'c Esperado [Mpa]	Cemento [Kg]	Agua [Kg]	Agg Grueso [Kg]	Agg Fino [Kg]	Caucho [kg]	Sílica Fume [kg]	% Sílica Fume	% Reciclado Caucho	W/C	Peso T [kg]
1		618	246	517	751	0	0		0%		2133
2		618	246	517	698	53	0	0%	7%		2133
3	35	618	246	517	638	113	0		15%	0,40	2133
4		553	244	514	746	0	61		0%		2117
5		553	244	514	694	52	61	10%	7%		2117
6		553	244	514	634	112	61		15%		2117
7		599	268	502	728	0	0		0%		2096
8		599	268	502	677	51	0	0%	7%		2096
9	30	599	268	502	619	109	0		15%	0,45	2096
10		536	266	498	723	0	60		0%		2083
11		536	266	498	672	51	60	10%	7%		2083
12		536	266	498	615	108	60		15%		2083

2.2.2. ENSAYO DE ESPECÍMENES

Para evaluar las diferentes características adquiridas al implementar las fibras de acero, reemplazo parcial del agregado fino y micro sílice en la fórmula del hormigón convencional, se hará uso de las siguientes normas que estipulan los procesos y métodos de recolección de datos:

- ASTM C39 Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- ASTM C496 Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- ACI 544.2R Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete (Impact Resistance)
- ASTM C469 Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression

Además, se realizará una evaluación visual acerca de las características de trabajabilidad.

2.3. METODOLOGÍA

2.3.1. PROCESO DE MEZCLADO Y PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES

2.3.1.1. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

Como se menciona en a la sección 2.1.3, el proceso de mezclado se realizó de manera estándar bajo la norma correspondiente a preparación de especímenes para ensayos. Para las dosificaciones que contenían fibras, se añadió el porcentaje correspondiente al final de todo el proceso de mezclado y de forma controlada para evitar el aglomeramiento de fibras alargando el proceso de mezclado unos 3 minutos más para asegurar la dispersión uniforme en la matriz fresca del hormigón.

Para el proceso de compactación del material en los encofrados respectivos, se realizó el vibrado externo en una mesa vibratoria hasta poder observar una compactación aceptable evitando la segregación y una exposición alargada. El proceso de preparación de especímenes se lo realizó en el número de capas correspondientes y dando los golpes necesarios en la parte externa para eliminar el aire atrapado en la mezcla.

Se prepararon sets de 2 cilindros de 6x12[in] y 8 cilindros 4x8[in] que fueron mantenidos en proceso de curado estándar durante 7 y 28 días para la obtención de los datos de resistencia a compresión, tensión, impacto y módulo de elasticidad correspondientes.

2.3.1.2. HORMIGÓN CON CONTENIDO DE CAUCHO

El proceso de mezclado se lo realizó con la misma metodología, pero agregando las partículas de caucho al momento de adicionar el agregado fino en el proceso, asegurando su distribución uniforme en la pasta del hormigón. Para esta dosificación, se optó por dividir el caucho reciclado en un 65% de polvo y un 35% de partículas más gruesas.

El proceso de compactación se lo realizó de manera normal, mediante varillado y golpes externos para eliminar residuos de aire dentro de la matriz de hormigón en las capas

correspondientes. De igual forma, se prepararon sets de 2 cilindros de 6x12[in] y 8 cilindros 4x8[in] que fueron mantenidos en proceso de curado durante 7 y 28 días para la obtención de datos de interés.

Además, en esta mezcla experimental se realizará la adición del cementante Sílica Fume en un 10% en base al cementante principal, debido a que se conoce que mejora las propiedades de resistencia a la compresión del elemento, tratando de contrarrestar el efecto de vacíos en la mezcla.

2.3.2. ENSAYO DE RESISTENCIA A CARGAS DINÁMICAS

De cada cilindro 6x12[in] de muestra se obtuvieron especímenes de 6x2.5[in] cortándolos para poder realizar el ensayo correspondiente. El objetivo de este trabajo de investigación es el evaluar la resistencia a impactos, por lo que el mecanismo de ensayo escogido fue el de someter al espécimen de hormigón a repetidos golpes hasta observar deterioro de la superficie (abrasión aprox. 1 [cm]) o el fallo total (ACI - Drop-Weight Test).

Este ensayo mide el número de golpes necesarios para llegar a un nivel de daño escogido como parámetro de falla. Este valor sirve como una estimación cualitativa de la energía absorbida por el espécimen al nivel de estrés y daño solicitados (ACI 544.2R, 1989).

El equipo implementado consta de un martillo operado de manera manual que tiene una masa de 10lbs recomendado por el ACI 544.2R, que transmite la energía de impacto a través de una bala de acero (eje de transmisión con bordes redondeados) que está en contacto con el hormigón.

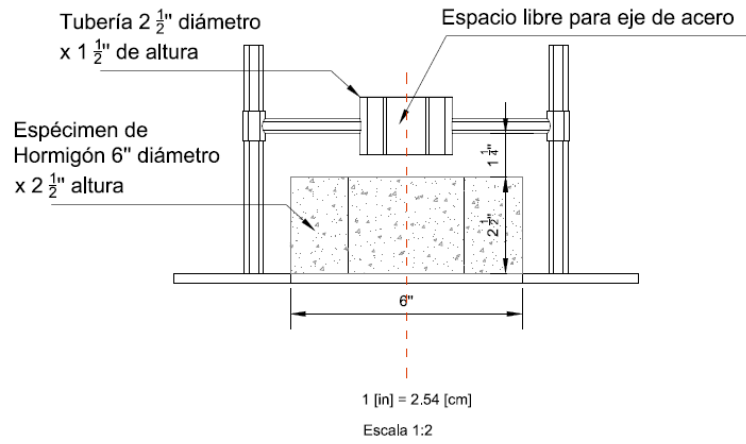


Gráfico 9: Plano sección transversal aparato de ensayo ACI544.2R Modificado

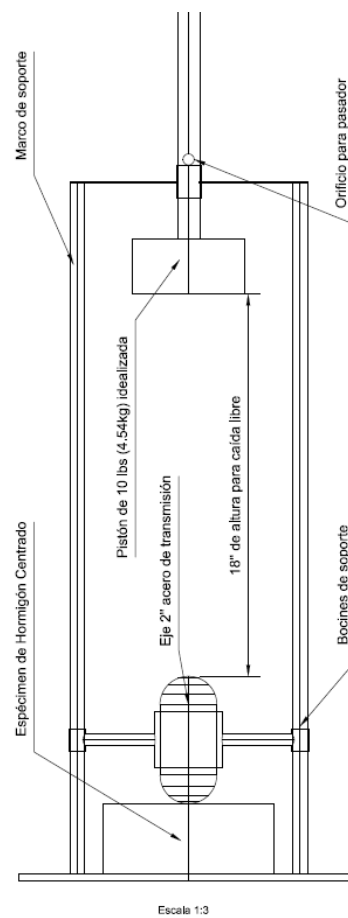


Gráfico 10: Plano vista frontal de aparato de ensayo ACI544.2R modificado



Fotografía 2: Aparato de Ensayo construido y utilizado para ensayos

Para la recolección de datos, a cada muestra cortada se le tomaron las medidas de espesor con valores cercanos a 1.5 [mm] de precisión. Posteriormente, la parte que se encontrará en contacto con la placa debe estar engrasado y debe ser sujetado de manera centrada para evitar que esta se mueva del lugar de ensayo. Se sometieron las muestras a repetidos golpes registrando el número de impactos hasta el fallo total de la muestra o hasta alcanzar el nivel de daño planteado.

2.3.3. CARACTERIZACIÓN VISUAL DEL HORMIGÓN FRESCO

Una de las propiedades importantes que caracteriza a una dosificación es la trabajabilidad y facilidad de compactación del hormigón. Para este trabajo de investigación se realizó una caracterización visual de la consistencia de las mezclas realizadas y el tiempo necesario para lograr una compactación aceptable con ayuda del uso de una mesa vibratoria al momento de compactar las capas para realizar los especímenes de ensayo, este parámetro servirá para poder determinar el nivel de rendimiento de la mezcla al ser maniobrado.

3. RESULTADOS

3.1. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

3.1.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Tabla 6: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 7 Días

Día	W/C	%	D [mm]	h [mm]	w [g]	[Mpa]	[kN]
7	0,35	0%	102,50	204,00	3781,50	38,10	323,70
7	0,35	0%	102,50	201,00	3764,50	41,20	340,00
7	0,35	1%	102,75	202,00	3891,50	38,30	317,50
7	0,35	1%	102,50	203,00	3902,50	40,20	330,90
7	0,35	2%	102,50	203,00	3973,00	39,60	326,50
7	0,35	2%	102,25	202,00	4000,00	40,60	333,50
7	0,40	0%	102,75	204,00	3808,50	34,30	283,70
7	0,40	0%	102,50	202,00	3770,00	35,30	291,20
7	0,40	1%	102,50	203,00	3866,00	34,80	285,00
7	0,40	1%	102,25	203,00	3840,50	30,10	246,70
7	0,40	2%	102,50	203,00	3874,50	29,20	240,10
7	0,40	2%	102,25	203,00	3864,50	30,50	250,40

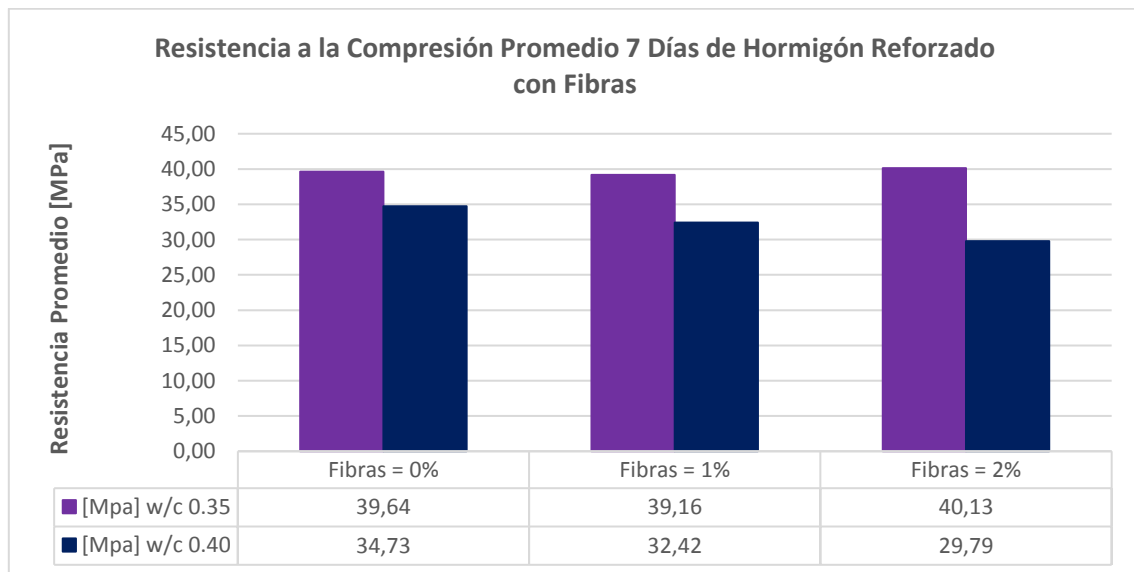


Gráfico 11: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 7 Días

Tabla 7: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 28 Días

Día	W/C	%	D [mm]	h [mm]	w [g]	[Mpa]	[kN]
28	0,35	0%	102,50	204,00	3829,00	43,40	358,50
28	0,35	0%	102,75	204,00	3786,00	40,00	331,70
28	0,35	1%	102,50	204,00	3931,00	45,60	375,30
28	0,35	1%	102,25	204,00	3952,50	45,00	369,40
28	0,35	2%	103,00	204,00	4058,50	47,90	398,90
28	0,35	2%	102,75	205,00	3973,00	42,70	353,70
28	0,40	0%	102,50	204,00	3846,00	39,80	328,10
28	0,40	0%	102,75	204,00	3820,00	39,70	328,90
28	0,40	1%	102,50	204,00	3822,50	36,40	300,80
28	0,40	1%	102,50	204,00	3867,50	40,50	333,00
28	0,40	2%	102,50	204,00	3930,50	35,90	294,50
28	0,40	2%	102,25	204,00	3893,50	35,10	295,80

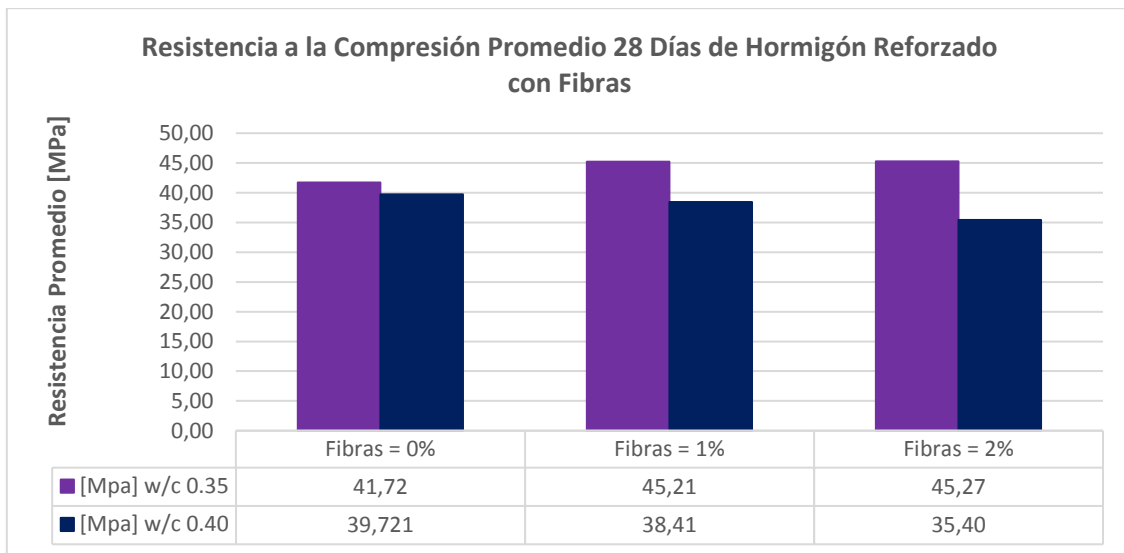


Gráfico 12: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 28 Días

3.1.2. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA

Tabla 8: Resistencia a la Tracción Indirecta Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 7 Días

Día	W/C	%	D [mm]	h [mm]	w [g]	[Mpa]	[kN]
7	0,35	0%	102,50	204,00	3824,50	2,90	95,20
7	0,35	0%	102,50	204,00	3796,00	3,60	118,00
7	0,35	1%	102,25	204,00	3938,00	4,50	147,70
7	0,35	1%	102,75	204,00	3992,00	5,60	184,10
7	0,35	2%	102,50	204,00	4064,50	8,00	262,30
7	0,35	2%	102,50	204,00	3977,00	7,10	233,30
7	0,40	0%	102,50	204,00	3889,00	2,50	82,50
7	0,40	0%	102,50	205,00	3829,00	2,30	75,40
7	0,40	1%	102,00	205,00	3817,00	4,30	142,50
7	0,40	1%	102,50	206,00	3889,00	4,70	154,40
7	0,40	2%	102,00	205,00	3711,00	4,90	182,00
7	0,40	2%	102,50	205,00	3830,00	5,90	193,80

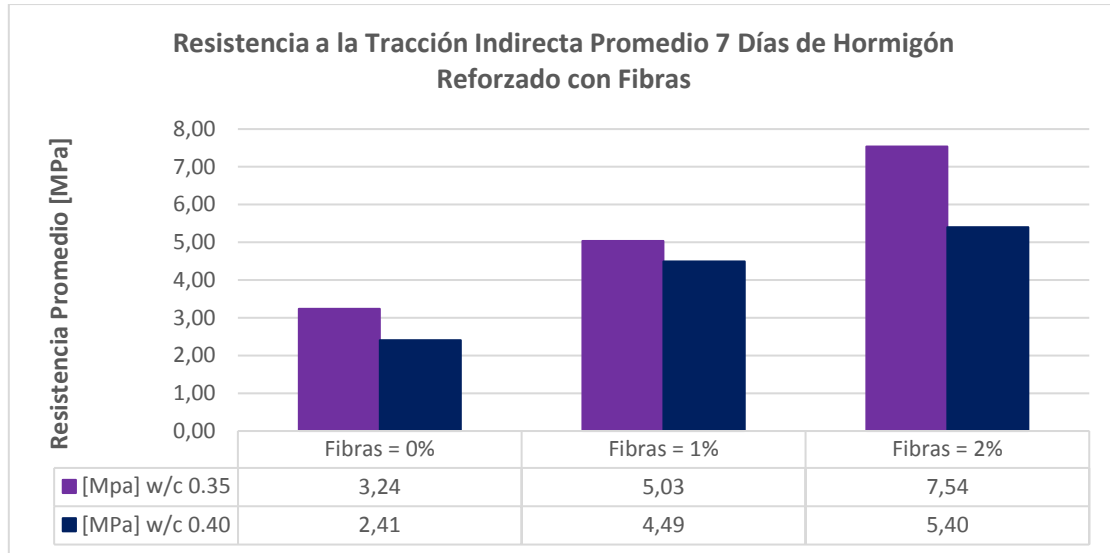


Gráfico 13: Resistencia a la Tracción Indirecta Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 7 Días

Tabla 9: Resistencia a la Tracción Indirecta Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 28 Días

Día	W/C	%	D [mm]	h [mm]	w [g]	[Mpa]	[kN]
28	0,35	0%	102,50	205,00	3745,00	2,40	78,90
28	0,35	0%	102,50	204,00	3768,00	2,40	78,90
28	0,35	1%	102,50	204,00	3957,50	5,80	119,60
28	0,35	1%	102,75	204,00	4003,00	6,60	217,70
28	0,35	2%	102,50	204,00	4082,00	10,80	354,60
28	0,35	2%	102,50	204,00	4031,50	10,20	334,50
28	0,40	0%	102,50	204,00	3820,00	2,70	88,60
28	0,40	0%	102,00	204,00	3798,00	2,40	78,60
28	0,40	1%	102,75	205,00	3956,00	6,00	198,10
28	0,40	1%	102,50	204,00	3901,00	6,50	213,90
28	0,40	2%	102,75	204,00	3902,00	7,80	255,80
28	0,40	2%	103,00	204,00	3852,00	8,20	268,90

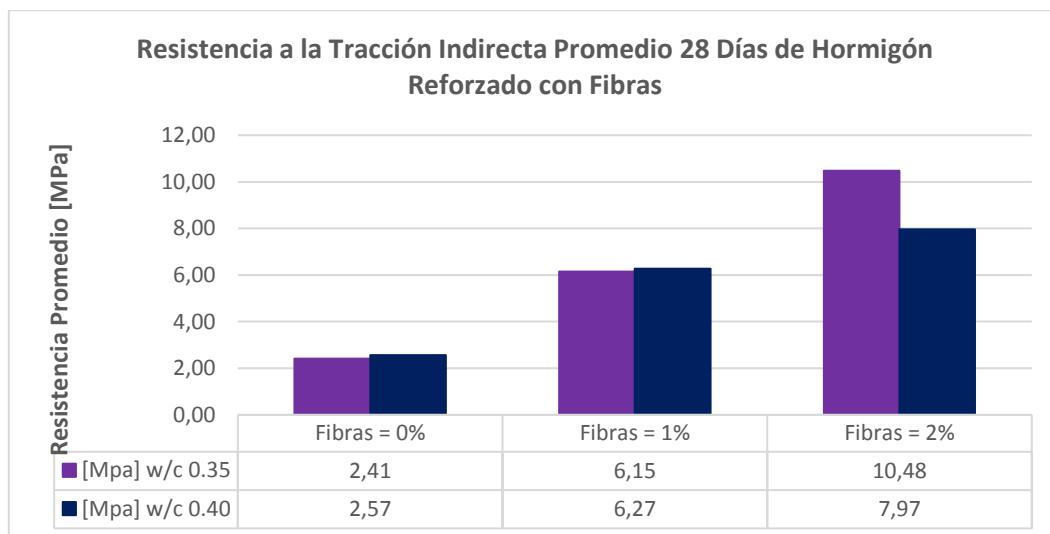


Gráfico 14: Resistencia a la Tracción Indirecta Promedio Hormigón Reforzado con Fibras 28 Días

3.1.3. RESISTENCIA A IMPACTOS.

Tabla 10: Resistencia a Impactos a los 28 Días de Curado. Parámetro de Falla: Rotura

Día	W/C	%	D [mm]	h [mm]	w [g]	N° Golpes
28	0,35	0%	152,50	64,50	2859,0	21
28	0,35	0%	153,00	63,50	2829,0	19
28	0,40	0%	152,25	63,50	2832,5	15
28	0,40	0%	152,50	64,00	2847,0	24

Tabla 11: Resistencia a Impactos a los 28 Días de Curado. Parámetro de Falla: 1 [cm] de Abrasión

w/c	0,35				0,40			
% Fibras	1%		2%		1%		2%	
N° Golpes	Profundidad de Abrasión en [mm]							
75	3	3	3	2	3	3	3	2
100	4	4	3	3	5	5	5	4
125	4	5	4	4	6	7	6	4
150	5	5	4	5	7	7	6	6
175	6	6	5	5	8	8	7	6
200	7	7	5	6	10	9	8	7
225	8	8	7	7	-	10	8	9
250	9	9	8	8	-	-	9	10
275	9	10	8	8	-	-	10	-
300	10	-	8	9	-	-	-	-
325	-	-	9	9	-	-	-	-
350	-	-	10	10	-	-	-	-

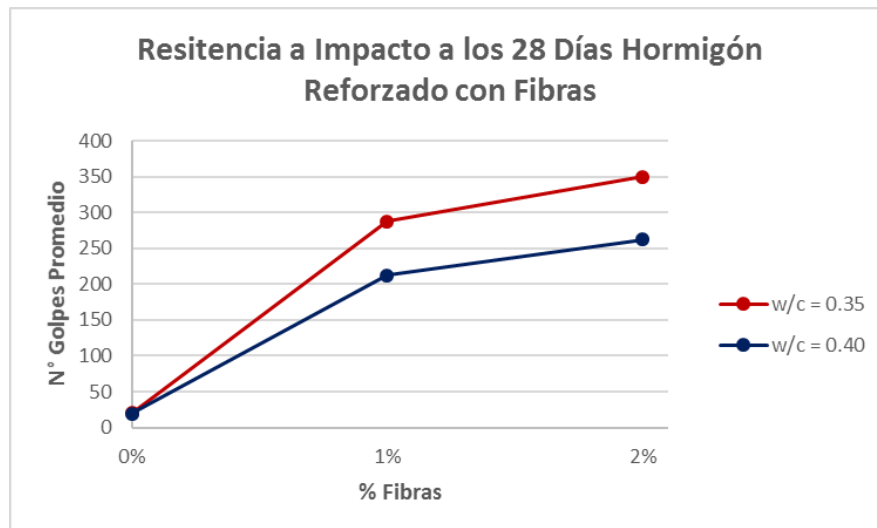


Gráfico 15: Resistencia a Impactos a los 28 Días de Hormigón Reforzado con Fibras

3.1.4. CARACTERIZACIÓN VISUAL

Se toma en cuenta el tiempo que le tomó a la mezcla alcanzar una compactación aceptable a través de una mesa vibratoria, hasta que visualmente fuera posible identificar indicios de salida de agua de la matriz del hormigón para poder caracterizar la consistencia de la mezcla de manera visual.

Tabla 12: Tiempo de Compactación por Vibrado

w/c	0.35			0.4		
%Fibras	0%	1%	2%	0%	1%	2%
Cilindros	t [s]	t [s]	t [s]	t [s]	t [s]	t [s]
1		7,0	10,0		5,0	10,0
2		7,5	12,0		6,0	9,5
3		6,5	9,5		5,5	11,5
4		8,0	9,5		5,0	10,0
5	Varillado	7,0	11,0	Varillado	6,5	9,5
6		7,5	11,0		4,5	9,0
7		7,0	10,5		6,0	11,0
8		8,0	9,0		5,0	9,0
9		6,5	10,0		6,0	10,0
10		6,5	10,0		6,0	8,5
Promedio	-	7,15	10,25	-	5,55	9,80

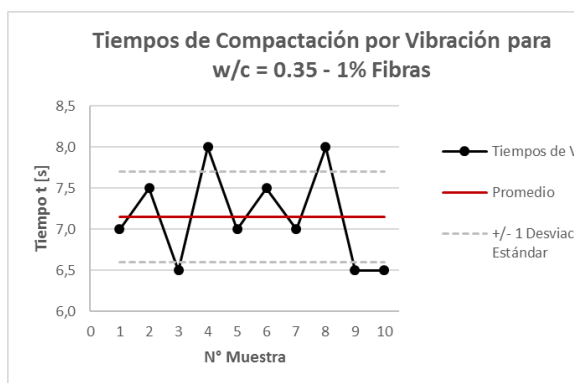


Gráfico 16: Compactación por Vibrado w/c=0.35 - 1% Fibras

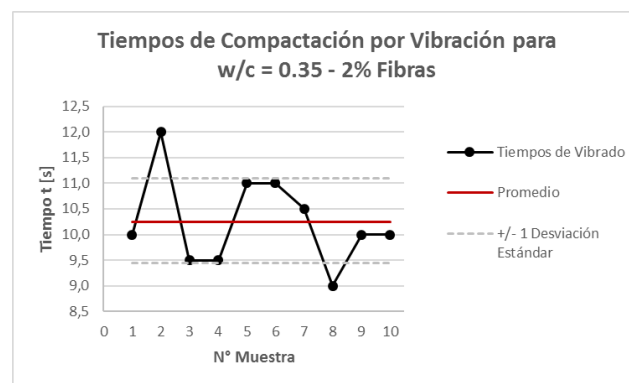


Gráfico 17: Compactación por Vibrado w/c=0.35 - 2% Fibras

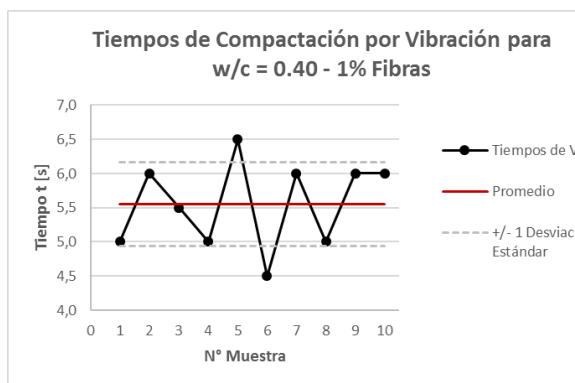


Gráfico 18: Compactación por Vibrado w/c=0.40 - 1% Fibras

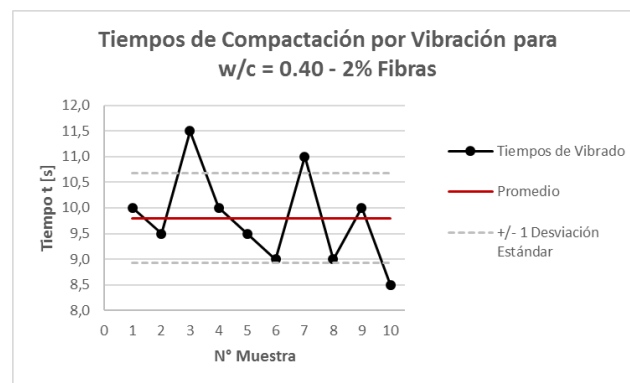


Gráfico 19: Compactación por Vibrado w/c=0.40 - 2% Fibras

3.2. HORMIGÓN CON PARTÍCULAS DE CAUCHO Y SÍLICA FUME

3.2.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Tabla 13: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 7 Días

Día	W/C	% Caucho	%SF	D [mm]	h [mm]	w [g]	[Mpa]	[kN]
7	0,40	0%	0%	102,75	204,00	3808,50	34,30	283,70
7	0,40	0%	0%	102,50	202,00	3770,00	35,30	291,20
7	0,40	7%	0%	102,75	204,95	3640,50	21,10	175,00
7	0,40	7%	0%	102,50	205,00	3633,00	18,80	155,20
7	0,40	15%	0%	102,75	205,00	3540,00	17,70	146,70
7	0,40	15%	0%	102,50	205,00	3579,00	18,40	151,60
7	0,40	0%	10%	102,50	204,00	3764,50	39,60	328,10
7	0,40	0%	10%	102,50	205,00	3745,50	38,00	313,60
7	0,40	7%	10%	102,75	205,00	3607,50	27,70	229,50
7	0,40	7%	10%	102,75	204,00	3593,00	27,70	229,00
7	0,40	15%	10%	102,75	204,00	3427,00	16,80	139,40
7	0,40	15%	10%	102,50	204,00	3411,00	17,10	141,20
7	0,45	0%	0%	102,25	204,00	3769,00	31,40	259,70
7	0,45	0%	0%	202,50	204,00	3714,50	29,80	246,50
7	0,45	7%	0%	102,50	204,00	3676,00	22,60	186,30
7	0,45	7%	0%	102,50	204,00	3701,50	23,00	189,60
7	0,45	15%	0%	102,50	204,00	3549,50	17,00	140,80
7	0,45	15%	0%	102,25	204,00	3527,00	15,00	123,60
7	0,45	0%	10%	102,50	204,00	3699,00	33,10	271,50
7	0,45	0%	10%	102,25	204,00	3707,50	33,50	274,80
7	0,45	7%	10%	102,50	204,00	3505,00	22,80	187,60
7	0,45	7%	10%	102,50	204,00	3527,50	22,40	184,30
7	0,45	15%	10%	102,50	204,00	3384,50	16,00	132,00
7	0,45	15%	10%	102,25	204,00	3407,00	16,40	135,30

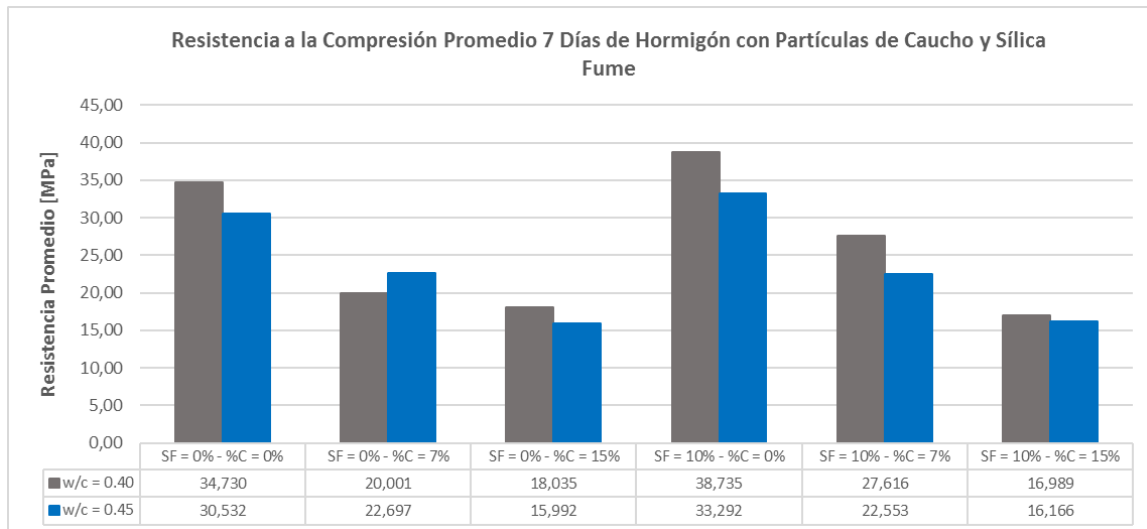


Gráfico 20: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 7 Días

Tabla 14: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 28 Días

Día	W/C	% Caucho	%SF	D [mm]	h [mm]	w [g]	[Mpa]	[kN]
28	0,40	0%	0%	102,50	204,00	3846,00	39,80	328,10
28	0,40	0%	0%	102,75	204,00	3820,00	39,70	328,90
28	0,40	7%	0%	102,25	204,00	3773,50	24,50	201,20
28	0,40	7%	0%	102,00	204,00	3671,50	26,00	213,00
28	0,40	15%	0%	102,50	204,00	3527,00	22,30	183,80
28	0,40	15%	0%	102,50	204,00	3524,50	22,20	183,30
28	0,40	0%	10%	102,25	204,00	3716,00	47,70	391,10
28	0,40	0%	10%	102,50	204,00	3741,00	47,90	393,90
28	0,40	7%	10%	102,00	204,00	3619,00	33,40	273,50
28	0,40	7%	10%	102,00	204,00	3609,00	31,60	260,80
28	0,40	15%	10%	102,50	204,00	3474,00	19,30	159,00
28	0,40	15%	10%	102,50	204,00	3402,00	18,60	153,10
28	0,45	0%	0%	102,50	204,00	3522,00	35,50	291,90
28	0,45	0%	0%	102,00	204,00	3456,50	35,70	293,60
28	0,45	7%	0%	102,50	204,00	3522,00	32,70	268,90
28	0,45	7%	0%	102,00	204,00	3766,00	31,80	197,80
28	0,45	15%	0%	102,25	204,00	3513,00	24,10	197,80
28	0,45	15%	0%	102,00	204,00	3527,00	23,70	194,20
28	0,45	0%	10%	102,75	204,00	3801,00	40,20	330,60
28	0,45	0%	10%	102,25	204,00	3767,50	39,90	328,10
28	0,45	7%	10%	102,50	204,00	3409,00	27,70	227,80
28	0,45	7%	10%	102,25	204,00	3385,50	27,90	229,40
28	0,45	15%	10%	102,00	204,00	3670,00	17,70	145,60
28	0,45	15%	10%	102,25	204,00	3547,50	18,30	150,50

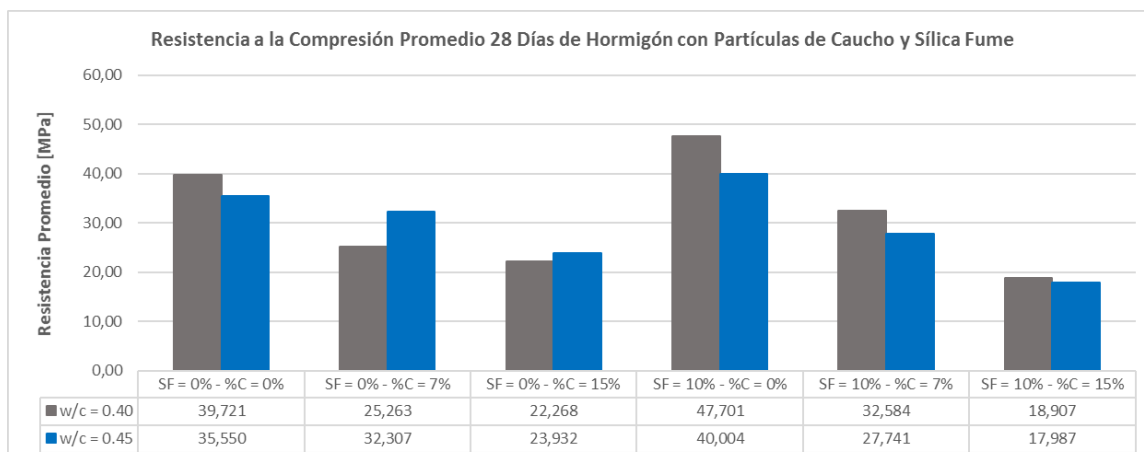


Gráfico 21: Resistencia a la Compresión Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 28 Días

3.2.2. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA

Tabla 15: Resistencia a Tracción Indirecta Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 7 Días

Día	W/C	% Caucho	%SF	D [mm]	h [mm]	w [g]	[Mpa]	[kN]
7	0,40	0%	0%	102,50	204,00	3889,00	2,50	82,50
7	0,40	0%	0%	102,50	205,00	3829,00	2,30	75,40
7	0,40	7%	0%	102,75	205,00	3632,50	1,80	59,40
7	0,40	7%	0%	103,00	204,00	3665,50	1,70	56,00
7	0,40	15%	0%	102,50	205,00	3532,50	1,80	59,20
7	0,40	15%	0%	102,50	205,00	3518,00	1,70	56,00
7	0,40	0%	10%	102,50	204,00	3768,50	2,80	92,10
7	0,40	0%	10%	102,50	204,00	3756,00	2,90	95,40
7	0,40	7%	10%	102,25	204,00	3608,00	2,40	78,70
7	0,40	7%	10%	102,75	204,00	3630,70	2,40	79,00
7	0,40	15%	10%	102,75	204,00	3443,00	1,60	52,80
7	0,40	15%	10%	102,00	205,00	3377,00	1,40	46,00
7	0,45	0%	0%	102,00	204,00	3792,00	2,50	81,90
7	0,45	0%	0%	102,25	204,00	3816,50	2,50	82,20
7	0,45	7%	0%	102,50	204,00	3674,00	2,70	88,50
7	0,45	7%	0%	102,55	204,00	3617,50	2,60	85,20
7	0,45	15%	0%	102,50	204,30	3524,00	2,00	65,70
7	0,45	15%	0%	102,25	204,00	3568,00	2,10	69,00
7	0,45	0%	10%	102,00	204,00	3652,50	2,50	82,00
7	0,45	0%	10%	102,50	204,00	3689,00	2,50	82,00
7	0,45	7%	10%	102,00	204,00	3479,00	2,30	75,40
7	0,45	7%	10%	102,00	204,00	3443,50	2,40	78,70
7	0,45	15%	10%	102,25	204,00	3399,00	1,40	46,00
7	0,45	15%	10%	102,25	204,00	3407,00	1,30	42,70

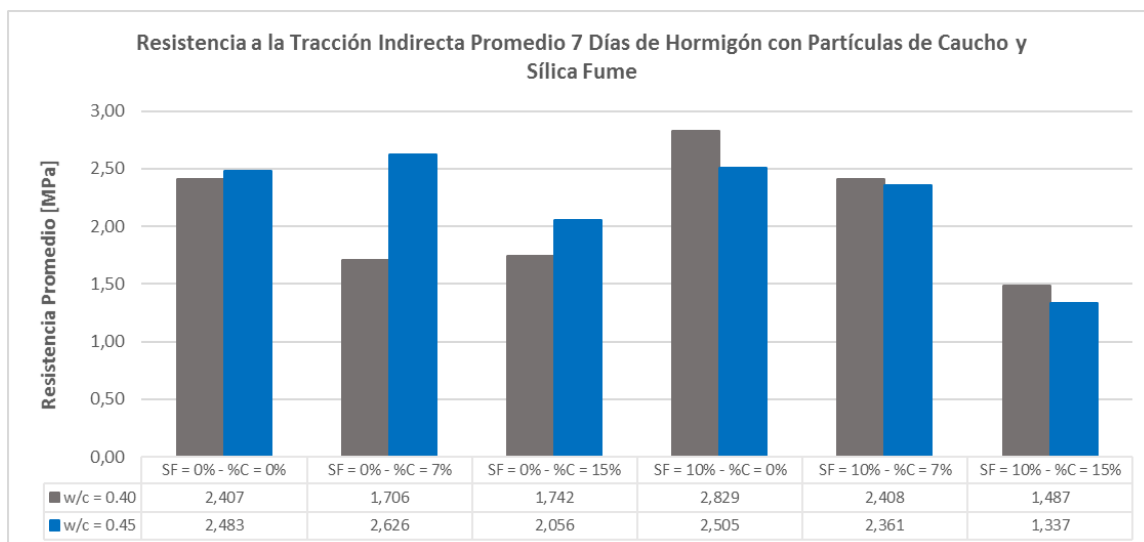


Gráfico 22: Resistencia a Tracción Indirecta Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 7 Días

Tabla 16: Resistencia a Tracción Indirecta Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 28 Días

Día	W/C	% Caucho	%SF	D [mm]	h [mm]	w [g]	[Mpa]	[kN]
28	0,40	0%	0%	102,50	204,00	3820,00	2,70	88,60
28	0,40	0%	0%	102,00	204,00	3798,00	2,40	78,60
28	0,40	7%	0%	102,50	204,00	3662,50	2,50	82,00
28	0,40	7%	0%	102,25	204,00	3677,00	2,50	81,90
28	0,40	15%	0%	102,25	204,00	3544,00	2,10	66,90
28	0,40	15%	0%	102,25	204,00	3559,50	2,20	72,20
28	0,40	0%	10%	102,00	204,00	3742,50	3,00	98,20
28	0,40	0%	10%	102,25	204,00	3774,50	2,60	85,40
28	0,40	7%	10%	102,00	204,00	3600,50	2,70	88,40
28	0,40	7%	10%	102,25	204,00	3574,50	2,20	72,00
28	0,40	15%	10%	102,50	204,00	3376,00	1,60	52,60
28	0,40	15%	10%	102,25	204,00	3450,50	1,70	55,80
28	0,45	0%	0%	102,00	204,00	3553,00	2,70	88,60
28	0,45	0%	0%	102,50	204,00	3672,50	2,80	91,80
28	0,45	7%	0%	102,25	204,00	3695,50	2,90	95,10
28	0,45	7%	0%	102,50	204,00	3689,00	2,80	91,80
28	0,45	15%	0%	102,25	204,00	3531,50	2,40	78,60
28	0,45	15%	0%	102,25	204,00	3503,00	2,30	75,40
28	0,45	0%	10%	102,50	204,00	3618,00	3,20	105,00
28	0,45	0%	10%	102,25	204,00	3631,50	3,20	105,00
28	0,45	7%	10%	102,50	204,00	3466,50	2,40	78,70
28	0,45	7%	10%	102,25	204,00	3679,50	2,70	88,60
28	0,45	15%	10%	102,00	204,00	3728,00	1,60	52,50
28	0,45	15%	10%	102,00	204,00	3505,00	1,40	45,90

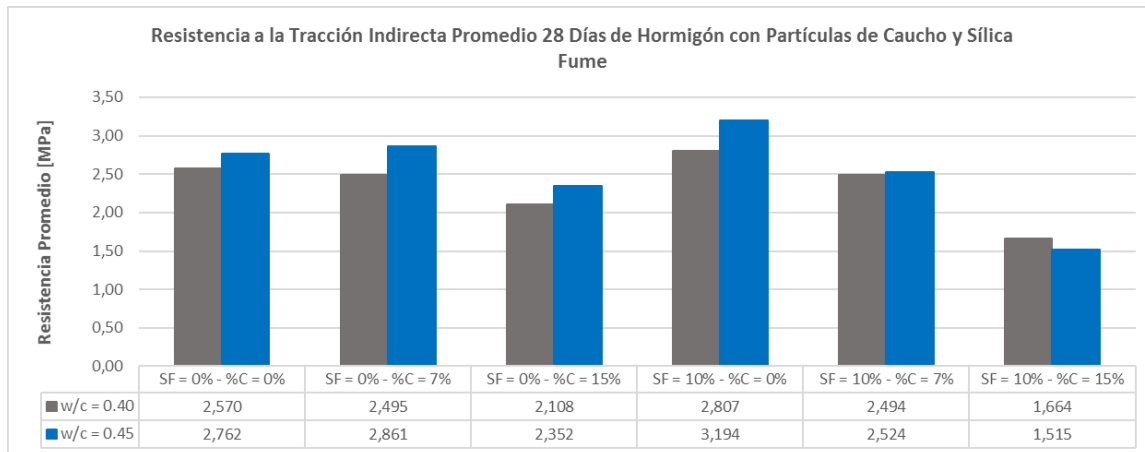


Gráfico 23: Resistencia a Tracción Indirecta Promedio Hormigón con Partículas de Caucho y Sílica Fume 28 Días

3.2.3. RESISTENCIA A IMPACTOS.

Tabla 17: Resistencia a Impactos a los 28 Días de Curado. Parámetro de Falla: Rotura

Día	W/C	% Caucho	%SF	D [mm]	h [mm]	w [g]	Nº Golpes
28	0,40	0%	0%	153,00	64,00	2363,0	7
28	0,40	0%	0%	153,00	64,50	2690,0	9
28	0,40	0%	0%	152,50	64,20	2534,5	3
28	0,40	7%	0%	152,50	64,00	2449,5	15
28	0,40	7%	0%	152,50	65,00	2565,5	7
28	0,40	7%	0%	152,50	64,00	2394,0	12
28	0,40	15%	0%	153,00	65,00	2620,5	34
28	0,40	15%	0%	153,25	64,00	2520,0	27
28	0,40	15%	0%	153,25	64,50	2511,0	22
28	0,40	0%	10%	153,00	64,50	2651,0	18
28	0,40	0%	10%	153,00	63,50	2667,0	14
28	0,40	0%	10%	152,75	64,00	2691,5	17
28	0,40	7%	10%	152,50	65,00	2565,5	21
28	0,40	7%	10%	152,25	64,00	2569,0	14
28	0,40	7%	10%	153,00	64,50	2599,5	19
28	0,40	15%	10%	152,50	64,50	2338,5	32
28	0,40	15%	10%	152,25	64,50	2344,5	23
28	0,40	15%	10%	152,50	63,00	2362,5	12
28	0,45	0%	0%	153,50	64,00	2453,0	5
28	0,45	0%	0%	153,50	64,00	2517,0	7
28	0,45	0%	0%	152,50	65,00	2509,5	8
28	0,45	7%	0%	152,50	65,00	2548,0	14
28	0,45	7%	0%	153,25	64,00	2569,0	16
28	0,45	7%	0%	153,50	64,00	2651,0	15
28	0,45	15%	0%	152,50	65,00	2532,5	25
28	0,45	15%	0%	153,25	64,50	2445,0	20
28	0,45	15%	0%	152,25	64,00	2498,0	21
28	0,45	0%	10%	153,50	64,00	2585,5	6
28	0,45	0%	10%	153,50	64,00	2624,5	9
28	0,45	0%	10%	153,50	64,50	2557,0	11
28	0,45	7%	10%	153,25	64,00	2477,5	12
28	0,45	7%	10%	152,25	65,00	2400,5	9
28	0,45	7%	10%	153,50	65,00	2412,0	8
28	0,45	15%	10%	153,25	64,00	2464,0	11
28	0,45	15%	10%	153,25	64,50	2414,0	15
28	0,45	15%	10%	152,50	64,00	2369,0	9

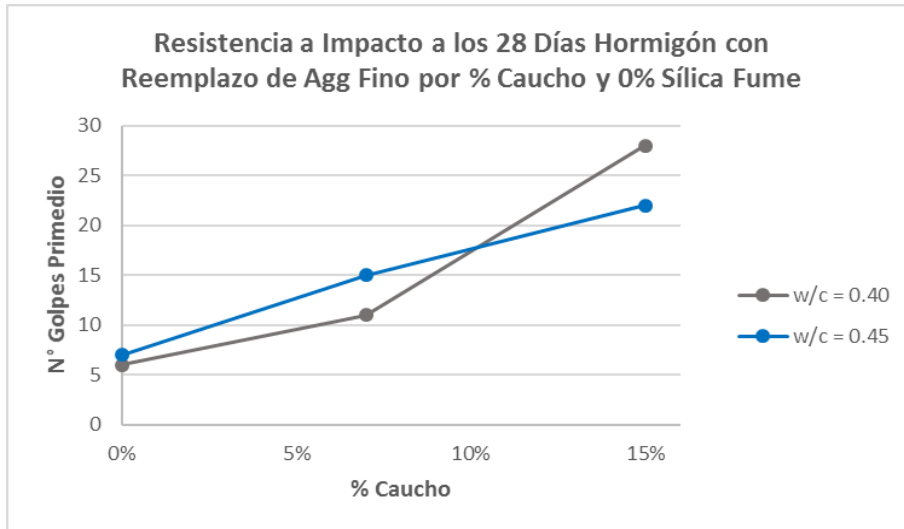


Gráfico 24: Resistencia a Impactos 28 Días % Caucho - 0% Sílica Fume

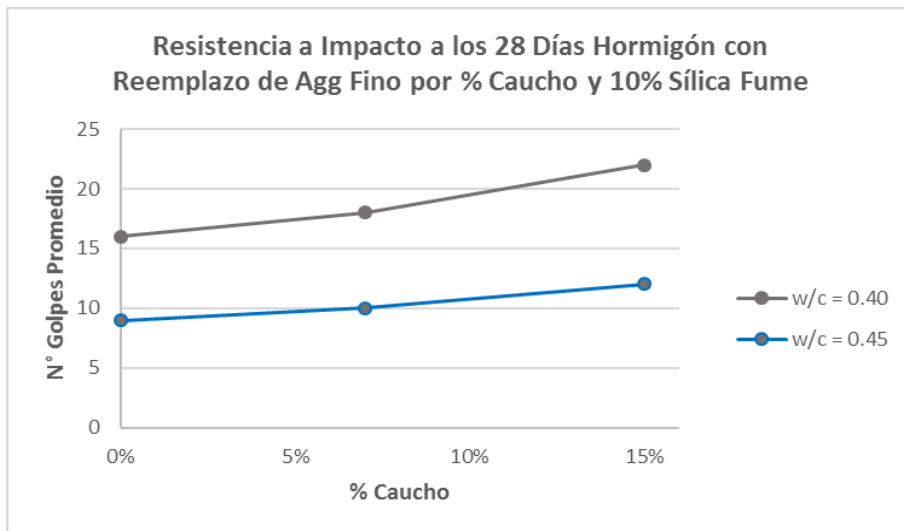


Gráfico 25: Resistencia a Impactos 28 Días % Caucho - 10% Sílica Fume

3.3. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Tabla 18: Módulos de Elasticidad de Mezclas Experimentales

w/c	%Fibras	%Caucho	%Sílica Fume	40% Carga Total	E [Gpa]
0,40	0%	-	-	131,30	24,98
0,35	0%	-	-	138,10	24,47
0,40	1%	-	-	148,60	23,33
0,35	1%	-	-	126,60	19,76
0,40	2%	-	-	150,40	25,75
0,35	2%	-	-	117,70	19,67
0,40	-	0%	0%	131,30	24,97
0,40	-	7%	0%	82,90	15,68
0,40	-	15%	0%	73,50	11,45
0,40	-	0%	10%	156,70	19,23
0,40	-	7%	10%	107,10	17,22
0,40	-	15%	10%	62,30	12,12
0,45	-	0%	0%	116,90	22,24
0,45	-	7%	0%	93,50	14,26
0,45	-	15%	0%	78,50	12,42
0,45	-	0%	10%	131,60	17,73
0,45	-	7%	10%	91,30	14,36
0,45	-	15%	10%	59,20	11,86

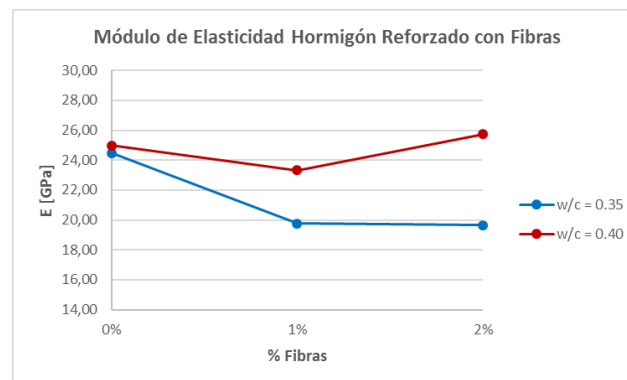


Gráfico 26: Módulo de Elasticidad Hormigón Reforzado con Fibras

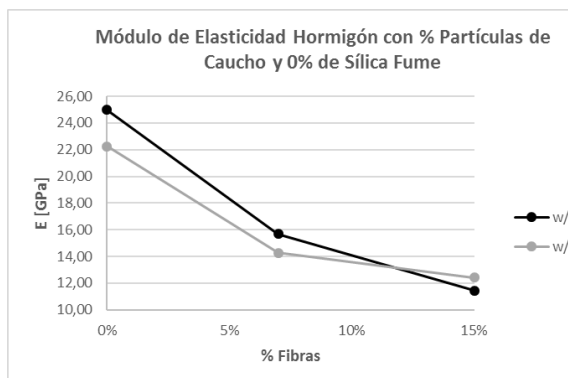


Gráfico 27: Módulo de Elasticidad Hormigón con % Caucho - 0% Sílica Fume

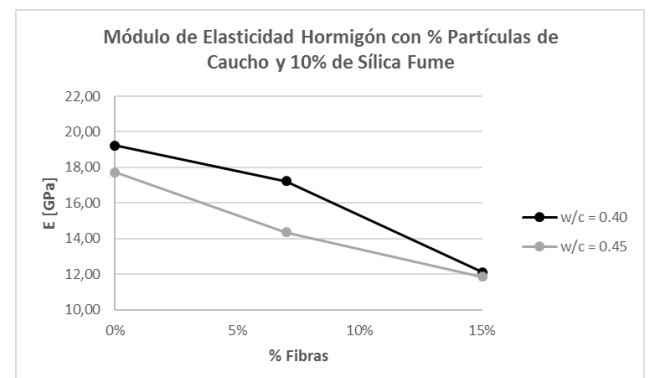


Gráfico 28: Módulo de Elasticidad Hormigón con % Caucho - 10% Sílica Fume

3.4. CURVAS ESFUERZO VS DEFORMACIÓN

3.4.1. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS ENSAYADO A COMPRESIÓN

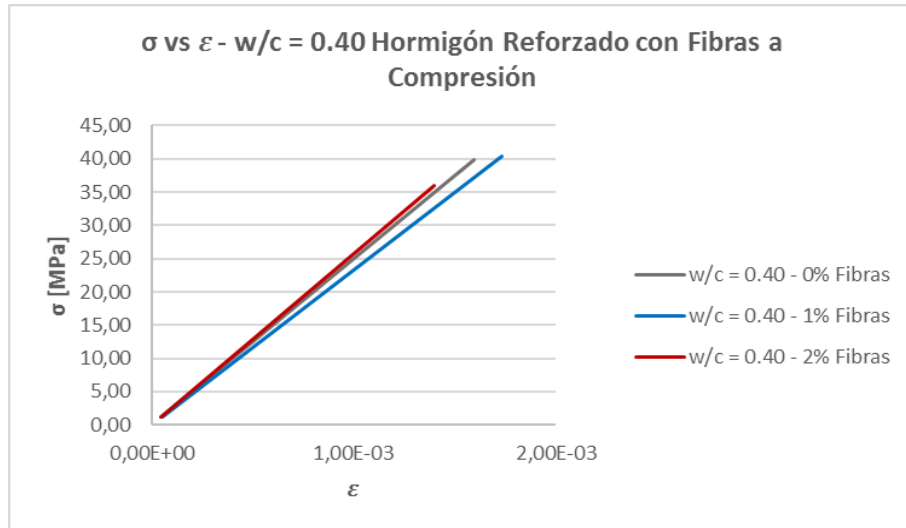


Gráfico 29: Curva Esfuerzo vs Deformación a Compresión Hormigón Reforzado con Fibras w/c=0.40

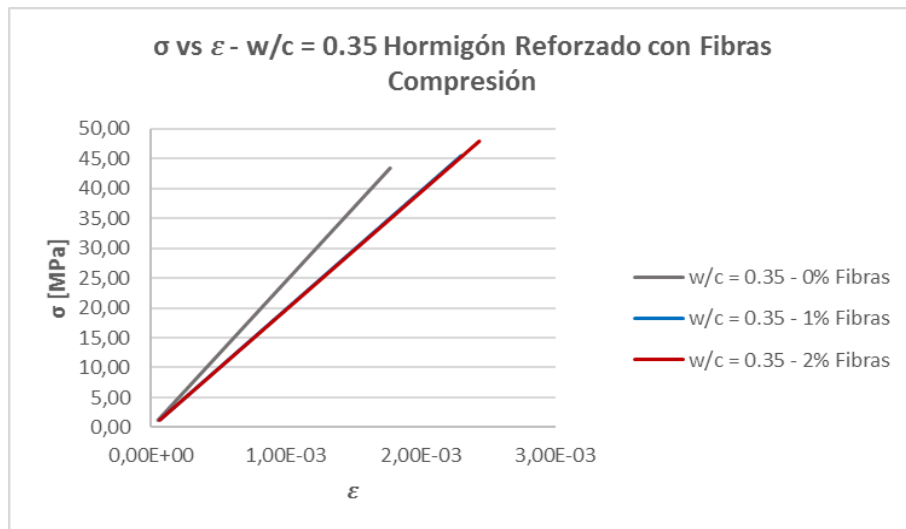


Gráfico 30: Curva Esfuerzo vs Deformación a Compresión Hormigón Reforzado con Fibras w/c=0.35

3.4.2. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS ENSAYADO A TENSIÓN INDIRECTA

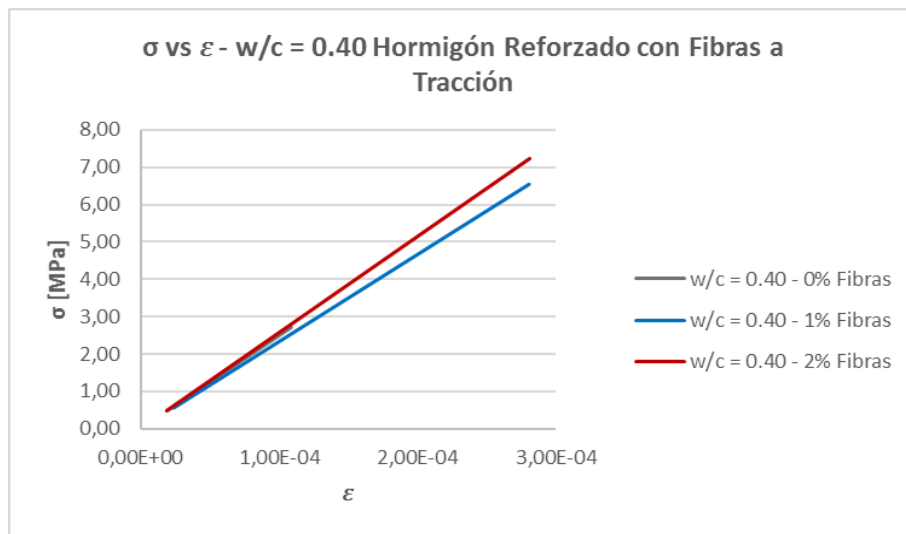


Gráfico 31: Curva Esfuerzo vs Deformación a Tracción Hormigón Reforzado con Fibras w/c=0.40

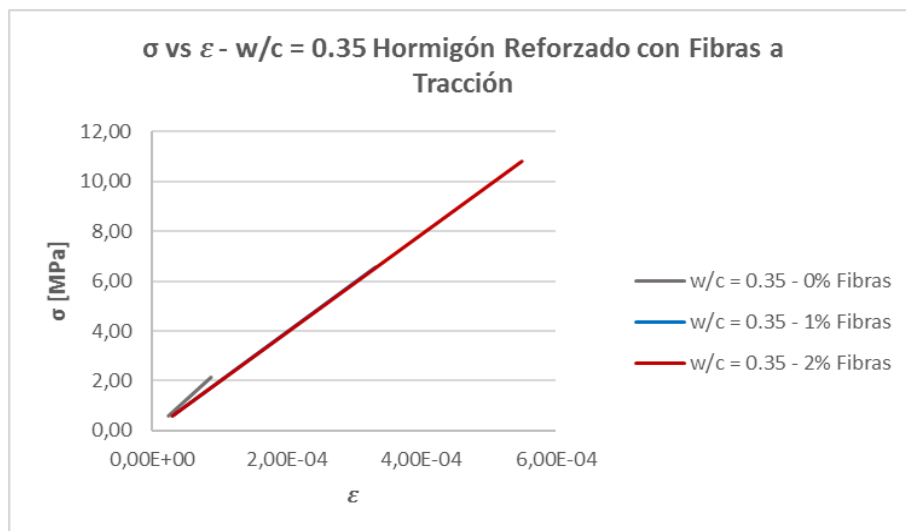


Gráfico 32: Curva Esfuerzo vs Deformación a Tracción Hormigón Reforzado con Fibras w/c=0.35

3.4.3. HORMIGÓN CON PARTÍCULAS DE CAUCHO Y 0% DE SÍLICA FUME ENSAYADO A COMPRESIÓN

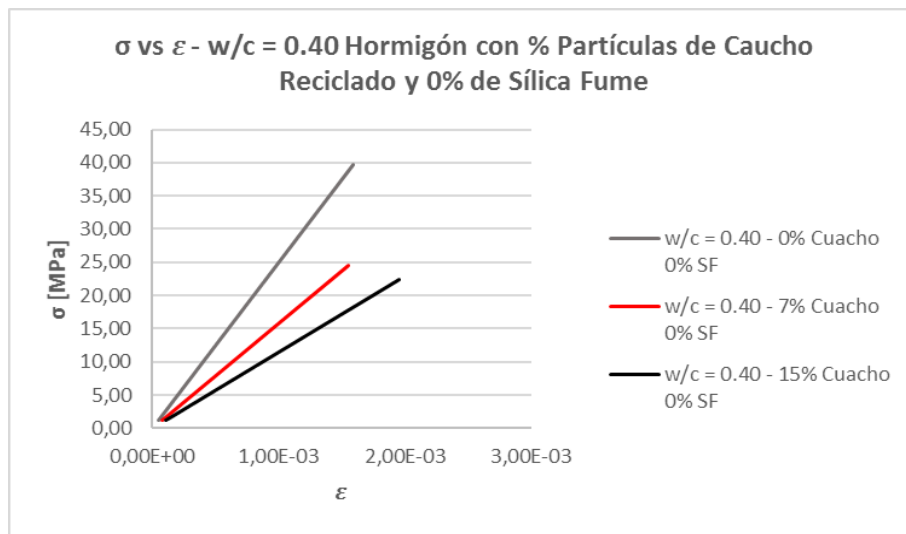


Gráfico 33: Curva Esfuerzo vs Deformación a Compresión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume $w/c=0.40$

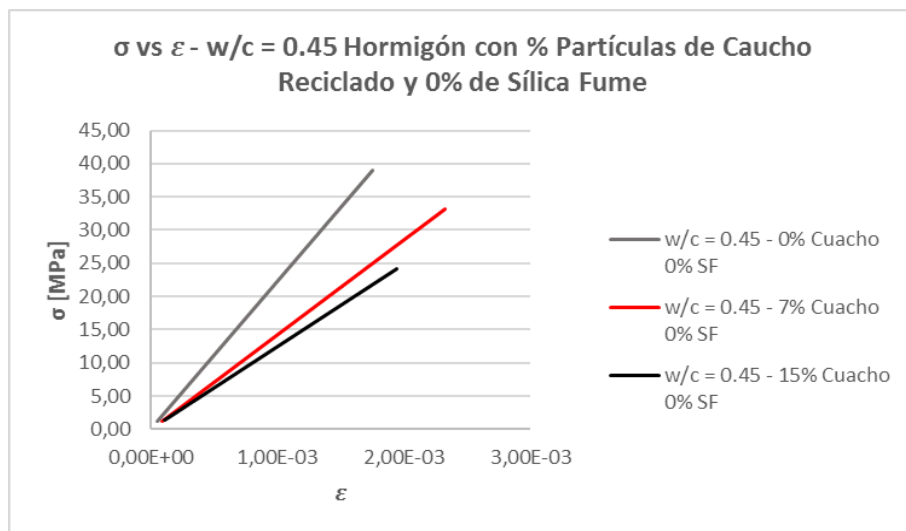


Gráfico 34: Curva Esfuerzo vs Deformación a Compresión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume $w/c=0.45$

3.4.4. HORMIGÓN CON PARTÍCULAS DE CAUCHO Y 0% DE SÍLICA FUME ENSAYADO TENSIÓN INDIRECTA

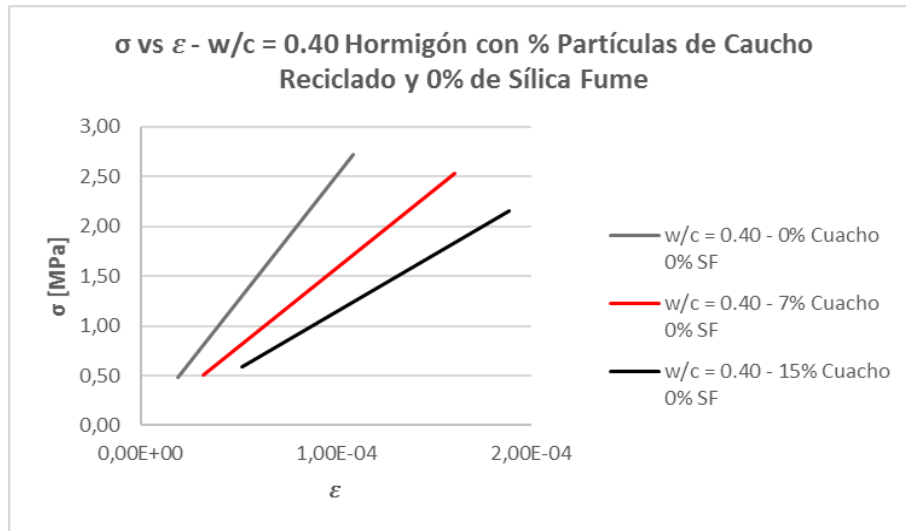


Gráfico 35: Curva Esfuerzo vs Deformación a Tensión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume $w/c=0.40$

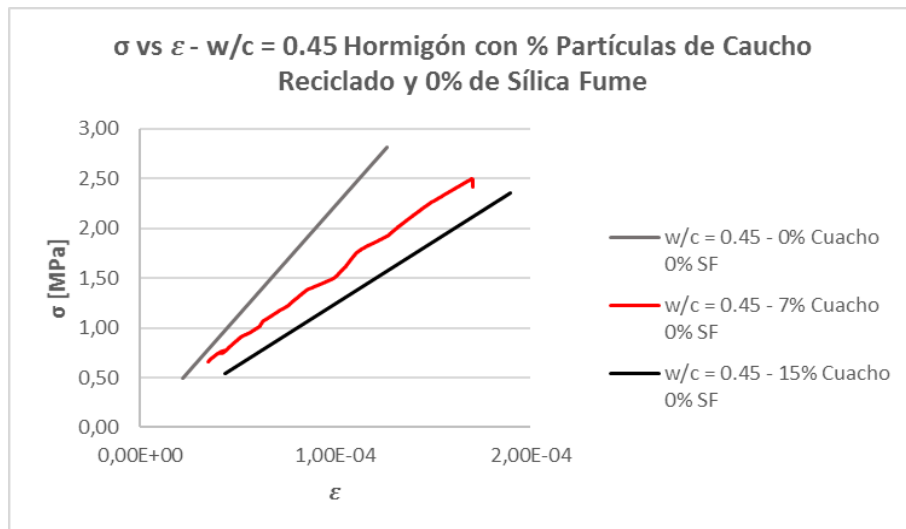


Gráfico 36: Curva Esfuerzo vs Deformación a Tensión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume $w/c=0.45$

3.4.5. HORMIGÓN CON PARTÍCULAS DE CAUCHO Y 10% DE SÍLICA FUME ENSAYADO A COMPRESIÓN

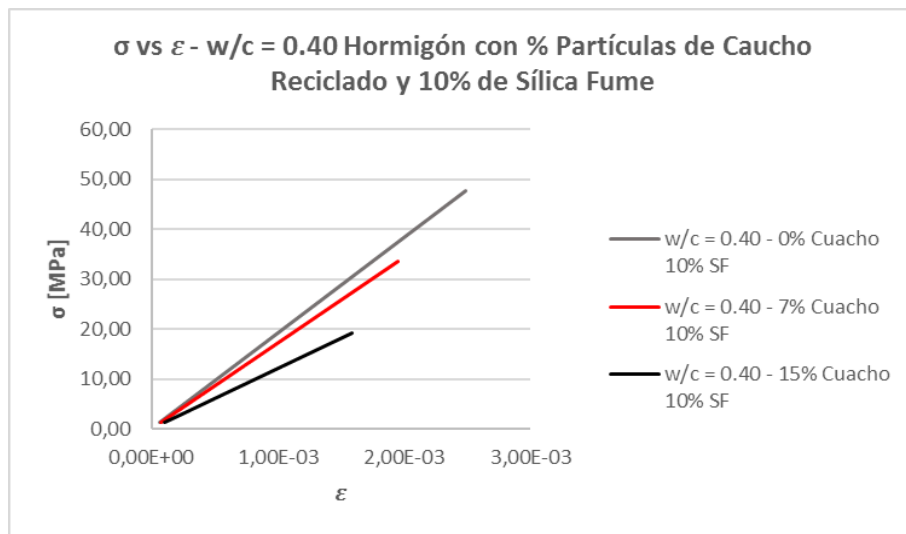


Gráfico 37: Curva Esfuerzo vs Deformación a Compresión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume $w/c=0.40$

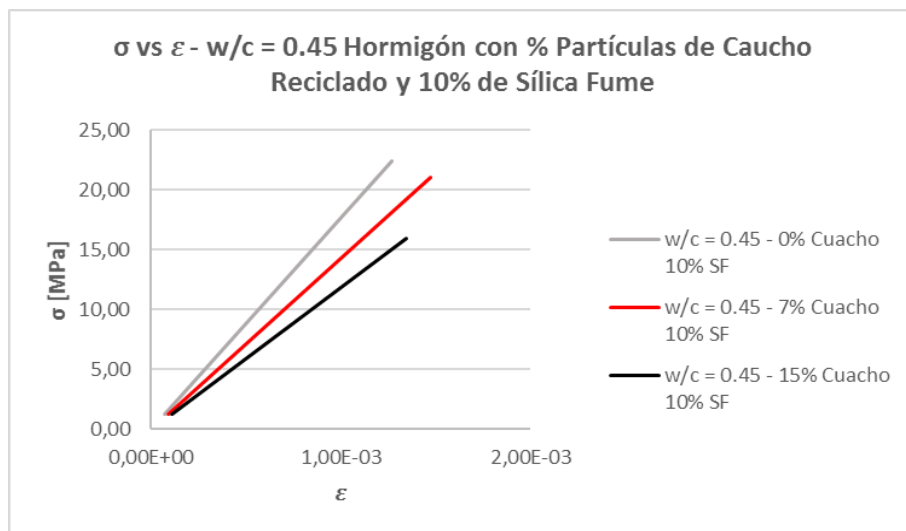


Gráfico 38: Curva Esfuerzo vs Deformación a Compresión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume $w/c=0.45$

3.4.6. HORMIGÓN CON PARTÍCULAS DE CAUCHO Y 10% DE SÍLICA FUME ENSAYADO TENSIÓN INDIRECTA

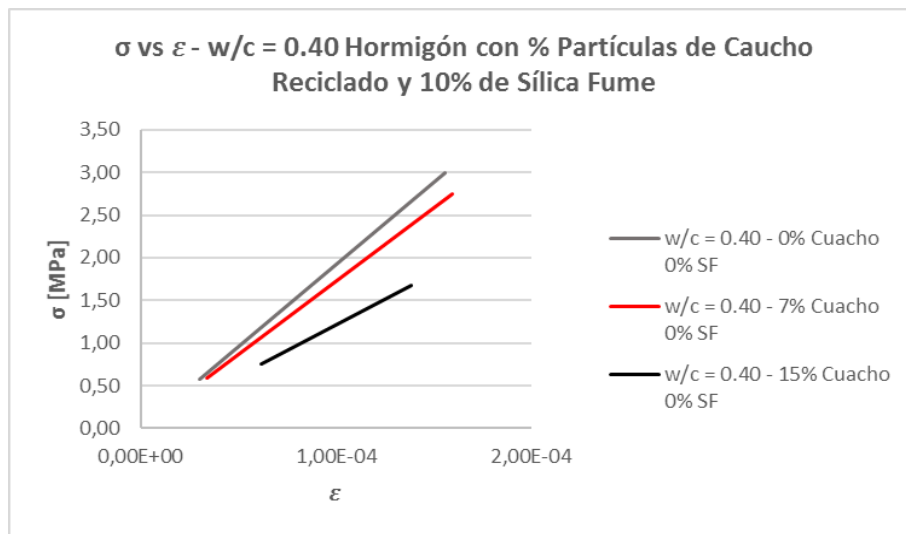


Gráfico 39: Curva Esfuerzo vs Deformación a Tensión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume $w/c=0.40$

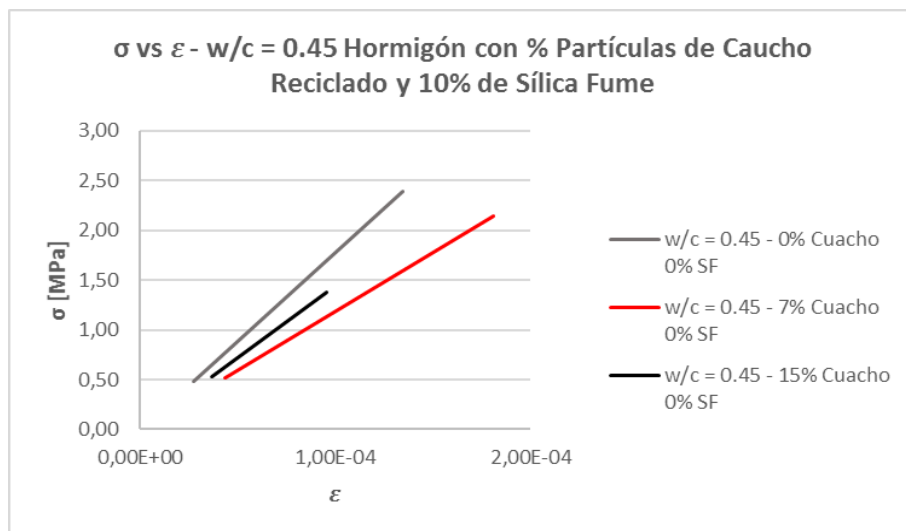


Gráfico 40: Curva Esfuerzo vs Deformación a Tensión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume $w/c=0.45$

3.5. CURVAS ESFUERZO VS TIEMPO

3.5.1. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS ENSAYADO A COMPRESIÓN

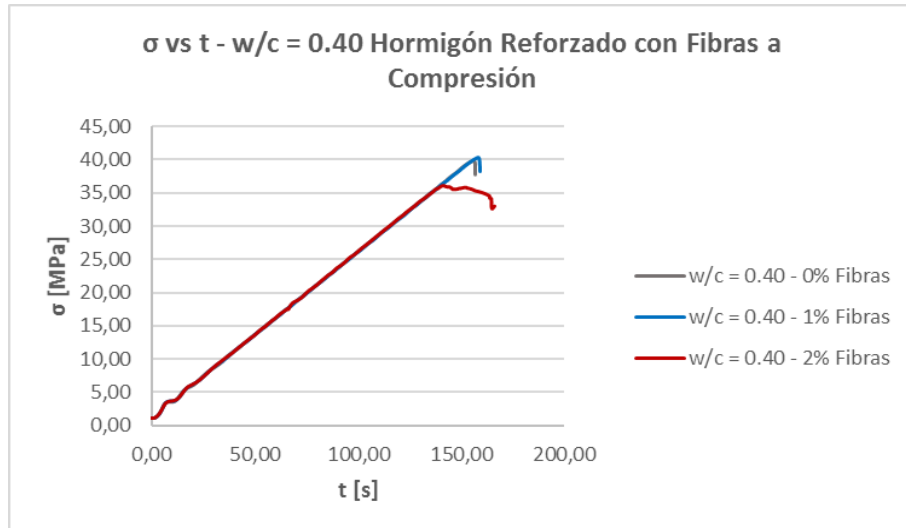


Gráfico 41: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Compresión Hormigón Reforzado con Fibras $w/c=0.40$

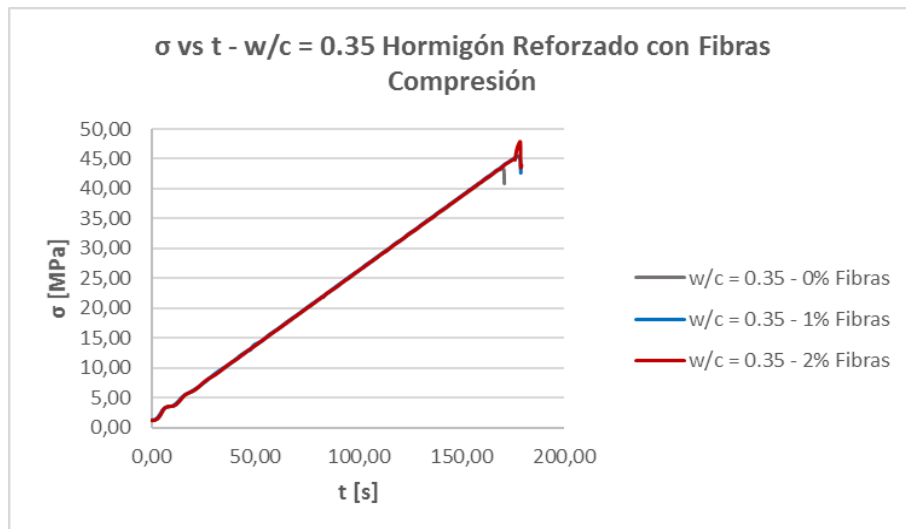


Gráfico 42: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Compresión Hormigón Reforzado con Fibras $w/c=0.35$

3.5.2. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS ENSAYADO A TENSIÓN INDIRECTA

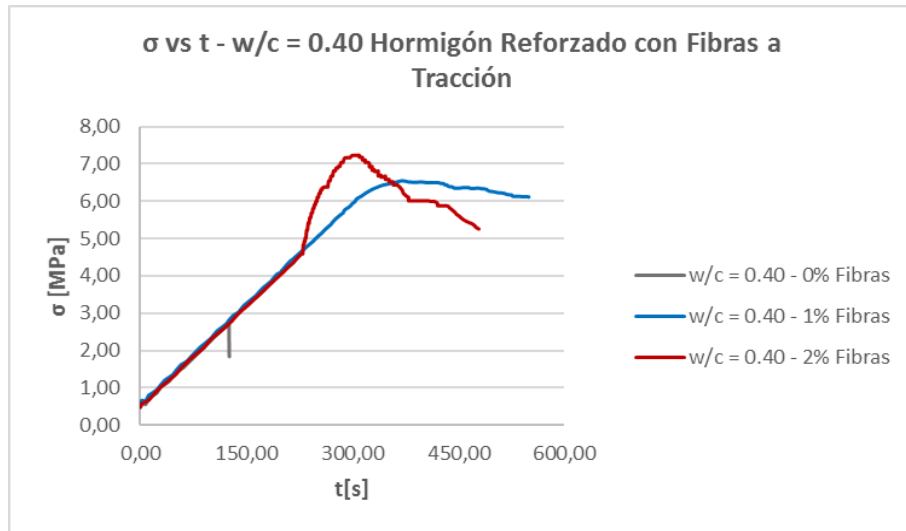


Gráfico 43: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Tensión Hormigón Reforzado con Fibras $w/c=0.40$

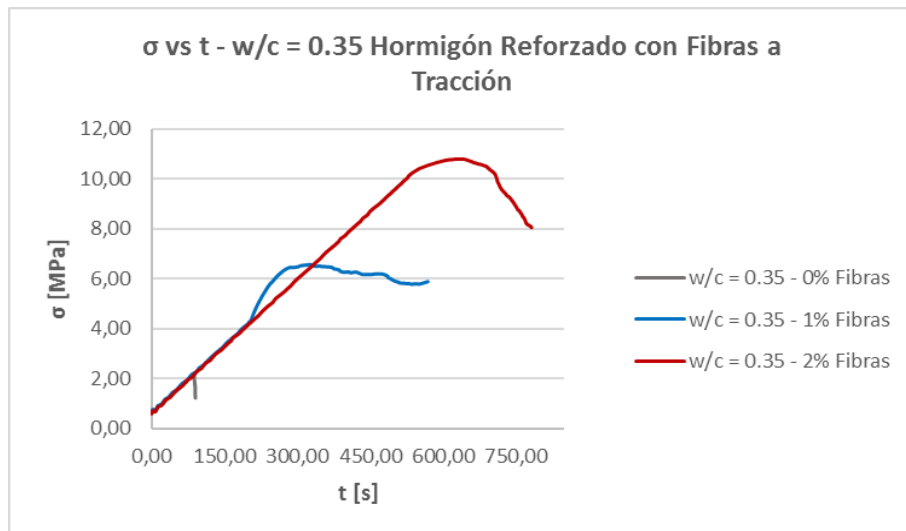


Gráfico 44: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Tensión Hormigón Reforzado con Fibras $w/c=0.35$

3.5.3. HORMIGÓN CON PARTÍCULAS DE CAUCHO Y 0% DE SÍLICA FUME ENSAYADO A COMPRESIÓN

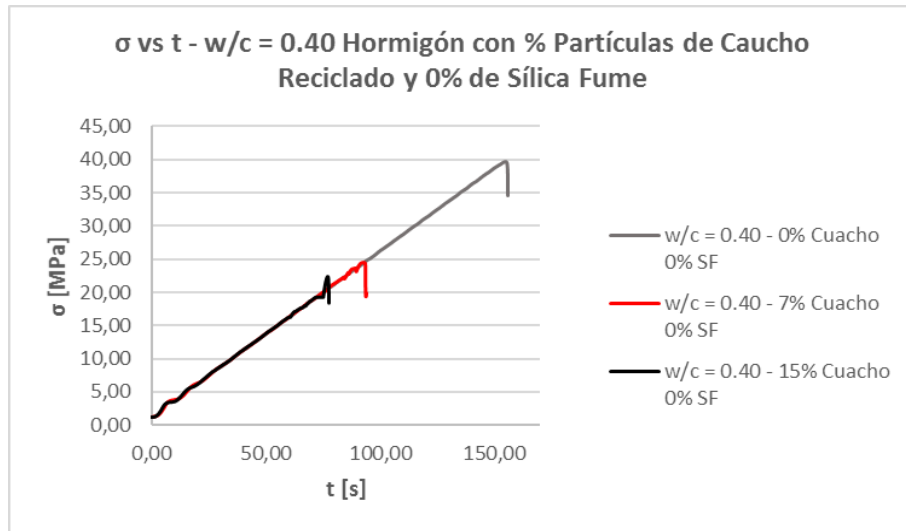


Gráfico 45: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Compresión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume w/c=0.40

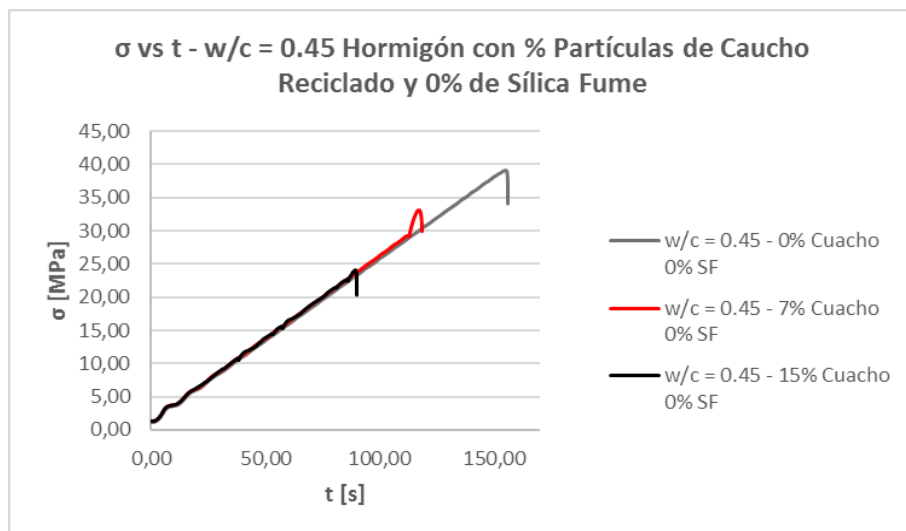


Gráfico 46: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Compresión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume w/c=0.45

3.5.4. HORMIGÓN CON PARTÍCULAS DE CAUCHO Y 0% DE SÍLICA FUME ENSAYADO TENSIÓN INDIRECTA

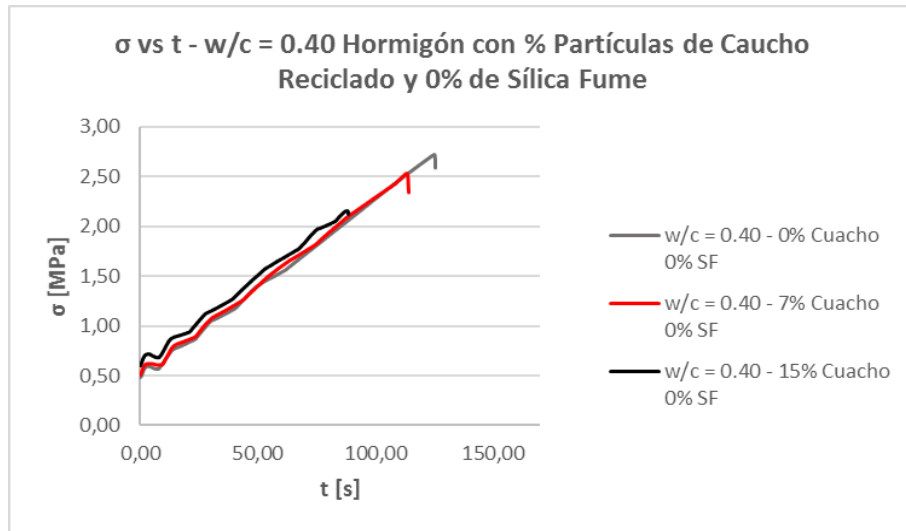


Gráfico 47: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Tensión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume w/c=0.40

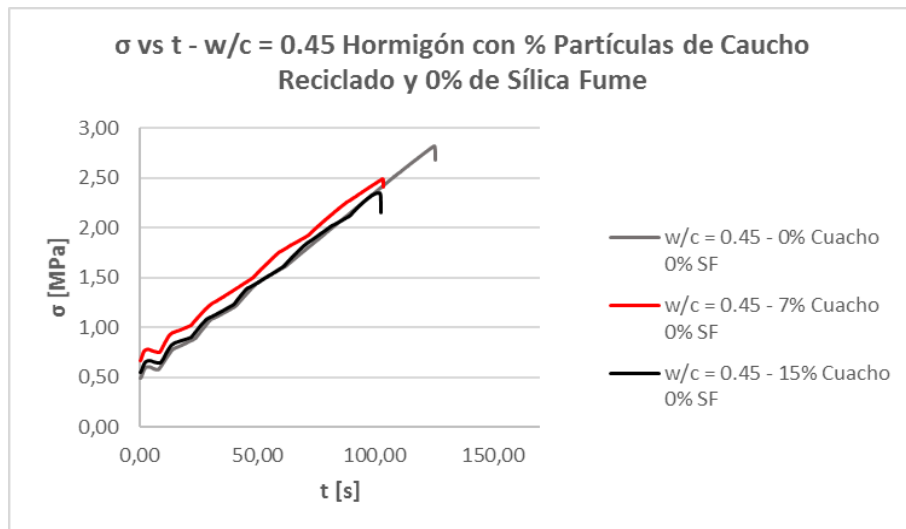


Gráfico 48: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Tensión Hormigón con % de Caucho – 0% Sílica Fume w/c=0.45

3.5.5. HORMIGÓN CON PARTÍCULAS DE CAUCHO Y 10% DE SÍLICA FUME ENSAYADO A COMPRESIÓN

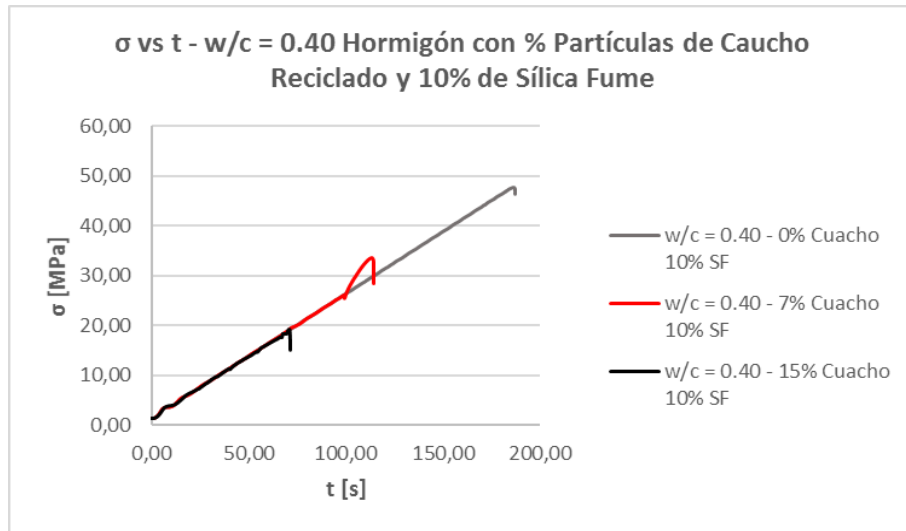


Gráfico 49: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Compresión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume $w/c=0.40$

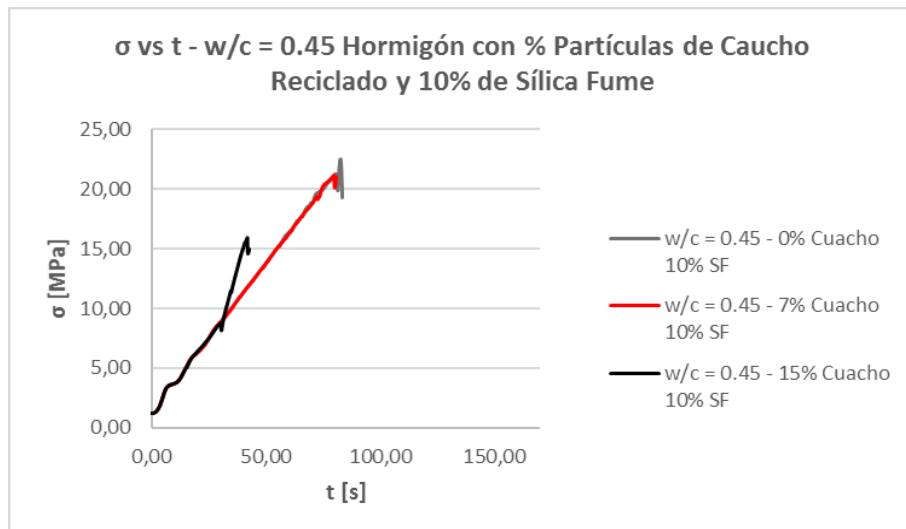


Gráfico 50: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Compresión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume $w/c=0.45$

3.5.6. HORMIGÓN CON PARTÍCULAS DE CAUCHO Y 10% DE SÍLICA FUME ENSAYADO TENSIÓN INDIRECTA

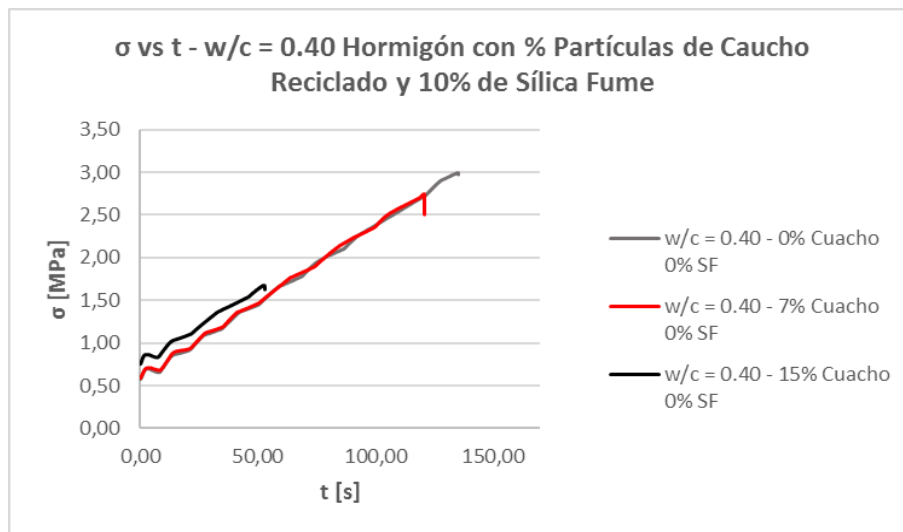


Gráfico 51: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Tensión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume w/c=0.40

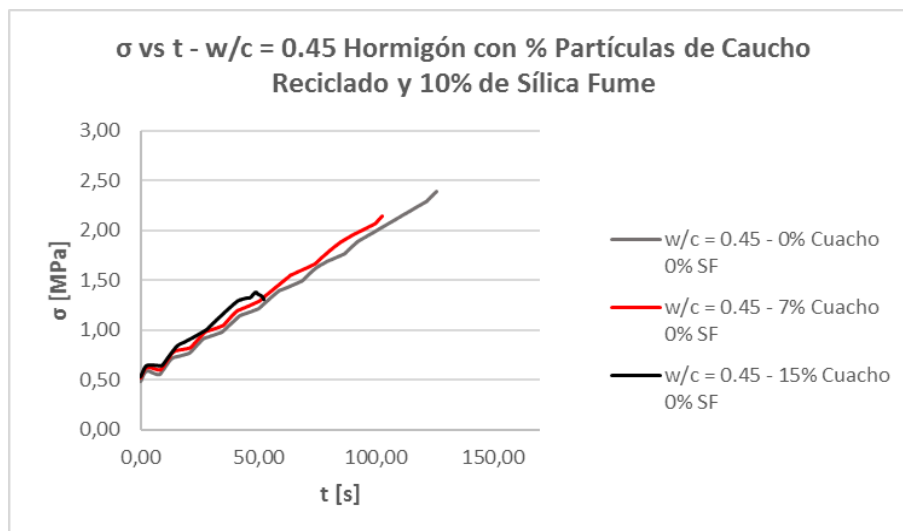


Gráfico 52: Curva Esfuerzo vs Tiempo a Tensión Hormigón con % de Caucho – 10% Sílica Fume w/c=0.45

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO

De los resultados obtenidos, se puede evidenciar que para la relación $w/c = 0.35$ existe un ligero aumento de resistencia a la compresión f'_c para los ensayos realizados a los 28 días de curado. El aumento medido fue de 8% comparado con el hormigón tradicional, debido a que el esfuerzo provocado en la matriz se transfiere a las fibras mediante la adherencia (traba) entre materiales (ACI544.4R, 1988). Las fibras actúan como refuerzo interno contrarrestando el efecto de tensiones internas en el hormigón hasta que la matriz comienza a fisurarse de manera progresiva, ya que las fibras de acero también impiden su propagación.

Para un volumen del 1% en fibras se tiene un mejor desempeño que para la cantidad de 2%. La mezcla posee una mejora trabajabilidad y no tiende a formar bolas de fibras que puedan causar una disminución en la resistencia del hormigón, mientras que para un volumen de 2% la trabajabilidad es muy baja inclusive al realizar la compactación por vibrado externo (Tabla 12). Este volumen es tan elevado que pudo ocasionar disminución en la resistencia debido a un mal hormigonado dejando espacios vacíos en la matriz.

En la mezcla con relación $w/c = 0.40$, se puede notar una disminución en la resistencia a la compresión conforme se realiza un aumento en el % de fibras metálicas, cuyo motivo pudo ser una posible segregación que no permitió la correcta adherencia del hormigón y el acero, distribución no uniforme de fibras ó poca una deficiente compactación teniendo una caída de resistencia del 10% comparado con el espécimen de control, comportamiento no deseable pero no tan significativo.

En los ensayos de tracción indirecta realizados en esta mezcla, los resultados son muy favorables. Para ambas relaciones w/c existe un notorio incremento en la resistencia a la tensión del material hasta del 77% comparado con el hormigón convencional. La falla en este estado de carga es de manera dúctil y progresiva, los esfuerzos internos se van redistribuyendo en las fibras hasta que el material se da ya sea por la fractura de las fibras (baja probabilidad) ó por que las fibras son arrancadas de la matriz del hormigón (Pullout), fenómeno gobernante de falla (Fotografía 3).



Fotografía 3: Falla dúctil con evidencia de fenómeno Pullout

El módulo de elasticidad medido para cada porcentaje de fibras y relación w/c de las mezclas de hormigón investigadas, indican que conforme se realiza un aumento de fibras en la matriz del hormigón, este adquiere una mayor capacidad de deformación y una mayor capacidad de absorber energía (Tabla 18). La excepción se da en la mezcla con un 2% de fibras y una $w/c = 0.40$ por una posible deficiente adherencia entre el hormigón y las fibras de acero provocando que la matriz de hormigón sea la que gobierne el comportamiento del elemento volviéndolo rígido.

El hormigón al ser reforzado con fibras metálicas incrementa su capacidad de resistencia a impactos, pasando de ser un material frágil a un material que es capaz de

mantener totalmente su integridad, pero con ligera abrasión o hundimiento en su superficie (Fotografía 4). Debido a la dificultad de lograr la completa rotura del material, el parámetro de falla fue tomado como un 1 cm de profundidad de abrasión promedio, valor que fue alcanzado luego de múltiples golpes con el ensayo Drop-weight Test realizado, comprobando un desempeño totalmente mayor al hormigón tradicional frente a esta sollicitación de carga dinámica (Gráfico 13).



Fotografía 4: 1 [cm] de Abrasión como Parámetro de Falla en Hormigón con Fibras

Para este caso, el porcentaje de 2% de fibras tuvo un mejor desempeño ante la resistencia a impactos por el volumen que gobierna en la matriz, en la cual en ciertos casos las mismas fibras recibían el impacto hasta alcanzar la falla, dejando al hormigón soportando la energía provocada por la caída del proyectil (Fotografía 12) pero con ayuda de las fibras en el interior continuó sin perder su integridad.

4.2. HORMIGÓN CON PARTÍCULAS DE CAUCHO Y SÍLICA FUME

De los ensayos realizados a compresión, se pudo observar una clara disminución de la resistencia a la compresión conforme se aumentaba el porcentaje de partículas de caucho en reemplazo del agregado fino. Sin embargo, al agregar Sílica Fume como cementante y tratar de contrarrestar este efecto, la resistencia a la compresión en comparación con los especímenes que tenían un contenido de 0% de Micro Sílice incrementa hasta un 23% de f'_c hasta alcanzar el 15% de contenido de caucho, donde vuelve a gobernar el comportamiento y la diferencia no es tan apreciable (Gráfico 19). Este fenómeno se produce debido a que las partículas de caucho al no poder formar una adherencia con el hormigón, y tener propiedades mecánicas distintas (resiliencia), genera un efecto similar al tener vacíos en el hormigón, lo que debilita la estructura (Najib et. al., 2018) y su capacidad de soportar la carga estática. Este efecto trató de contrarrestarse de igual manera al colocar en mayor porcentaje polvo de caucho un tamaño máximo nominal #30 en relación con el grano de caucho con un tamaño máximo nominal #8 (Gráfico 8). La relación $w/c = 0.40$, % de caucho de 7% y 10% de Sílica Fume muestra el mejor desempeño ante compresión.

De igual manera, los ensayos de tracción indirecta muestran una disminución conforme el porcentaje de caucho es aumentado en la matriz del hormigón. Con la adición de Micro Sílice, el aumento de resistencia a tensión es apenas del 8% en ciertos casos, ya que para este tipo de mezcla los resultados son muy variables y en su mayoría no mejoran el comportamiento (Gráfico 21).

Los ensayos realizados para el módulo de elasticidad para este tipo de hormigón muestran una disminución en los valores obtenidos conforme aumenta el contenido de caucho (Gráfico 25 y 26), gracias a las propiedades resilientes de este material

incorporado en la matriz del hormigón (Mohamed et. al., 2016) logra comportarse de manera “elástica” pero con bajas resistencias a sollicitaciones de carga estática.

Con los ensayos de impacto realizados se pudo comprobar que efectivamente la resistencia a impacto del hormigón con reemplazo de agregado fino por % de Caucho incrementa considerablemente hasta un 78% (Gráfico 22 y 23) comparado solamente con el hormigón simple. Para la mezcla que contenía un 0% de Micro Sílice la relación $w/c = 0.40$ posee un comportamiento frágil con la excepción al tener un porcentaje de caucho del 15% en donde supera el comportamiento de resistencia a impactos de la mezcla con relación $w/c = 0.45$ que predomina hasta un porcentaje del caucho del 7%. Con la incorporación de Micro Sílice como cementante en la mezcla, se puede observar que en este caso la relación $w/c = 0.45$ mejora su desempeño ante impactos a comparación con la relación $w/c = 0.40$ que parece volverse más frágil con una diferencia de hasta el 45%.

4.3. TIPOS DE FALLA

4.3.1. HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO

4.3.1.1. ENSAYOS A COMPRESIÓN

Los ensayos a compresión muestran un comportamiento dúctil y progresivo gracias al contenido de fibras en la matriz del hormigón. Basado en la norma ASTM C39, se puede clasificar la mayoría de las fallas observadas en esta investigación como falla tipo 4, con fractura diagonal sin esquinas fisuradas.



*Fotografía 5: Hormigón Reforzado con Fibras Falla
Tipo 4. ASTM C39*



*Fotografía 7: Hormigón Reforzado con Fibras Falla
Tipo 4. ASTM C39*



*Fotografía 6: Hormigón Reforzado con Fibras Falla
Tipo 4. ASTM C39*



*Fotografía 8: Hormigón Reforzado con Fibras Falla
Tipo 4. ASTM C39*

4.3.1.2. ENSAYOS A TRACCIÓN INDIRECTA

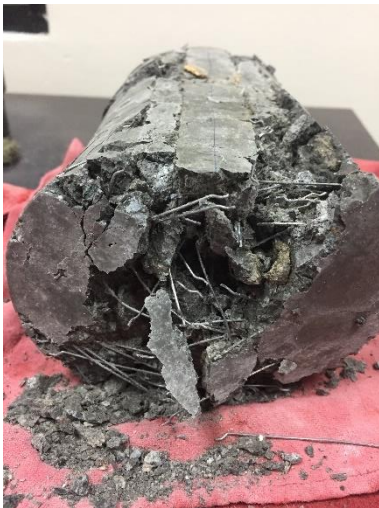
De igual manera la falla evidenciada en este ensayo muestra una falla dúctil, comparado con la falla del hormigón tradicional por esfuerzos de tensión internos. Se puede observar también el aplastamiento del hormigón es de manera progresiva dando paso al fenómeno de pull out de las fibras y deformaciones en las mismas por la transferencia de esfuerzos.



Fotografía 9: Falla Dúctil Hormigón Reforzado con Fibras



Fotografía 11: Falla Dúctil Hormigón Reforzado con Fibras



Fotografía 10: Falla Dúctil Hormigón Reforzado con Fibras



Fotografía 12: Falla Dúctil Hormigón Tradicional

4.3.1.3. ENSAYOS A IMPACTOS

En los ensayos de resistencia a impactos el hormigón de convencional falla al existir la rotura total del material mientras que el hormigón reforzado con fibras muestra una mayor capacidad de mantener su integridad, menor abrasión por la energía recibida del proyectil y sin pérdida de resistencia a cargas dinámicas. El parámetro de falla fue tomado como 1 [cm] de penetración en el hormigón para poder realizar las respectivas comparaciones.



Fotografía 13: Ensayo a Impacto Hormigón Tradicional



Fotografía 15: Abrasión en Hormigón con Fibras Ensayo a Impacto



Fotografía 14: 1 [cm] de Abrasión como Parámetro de Falla en Hormigón con Fibras



Fotografía 16: Abrasión en Hormigón con Fibras Ensayo a Impacto

4.3.2. HORMIGÓN CON PARTÍCULAS DE CAUCHO Y SÍLICA FUME

4.3.2.1. ENSAYOS A COMPRESIÓN

El contenido de caucho en la matriz del hormigón genera un efecto de vacíos en su estructura, por lo que facilita la propagación de fisuras dando como resultado principalmente fallas de Tipo 3, fisuras verticales y columnares de lado a lado.



*Fotografía 17: Hormigón con Partículas de Caucho
Falla Tipo Columnar ASTM C39*



*Fotografía 19: Hormigón con Partículas de Caucho
Falla Tipo Columnar ASTM C39*



*Fotografía 18: Hormigón con Partículas de Caucho
Falla Tipo Columnar ASTM C39*



*Fotografía 20: Hormigón con Partículas de Caucho
Falla Tipo 3 ASTM C39*

4.3.2.2. ENSAYOS A TRACCIÓN INDIRECTA

Los ensayos de tensión indirecta revelan siempre una falla igual a la del hormigón tradicional, debido a que el material intenta separarse perpendicularmente al eje de aplicación de la carga, los especímenes se parten a la mitad siendo posible observar también el contenido de caucho variable en cada muestra.



*Fotografía 21: Hormigón
Tradicional Ensayado a Tensión
0% Caucho*



*Fotografía 22: Hormigón
Tradicional Ensayado a Tensión
7% Caucho*



*Fotografía 23: Hormigón
Tradicional Ensayado a Tensión
15% Caucho*

4.3.2.3. ENSAYOS A IMPACTOS

A pesar de que la resistencia a impactos mejora considerablemente conforme se aumenta el porcentaje de caucho en el matriz del hormigón, este tipo de hormigón falla siempre produciéndose la rotura del elemento, siendo totalmente frágil.



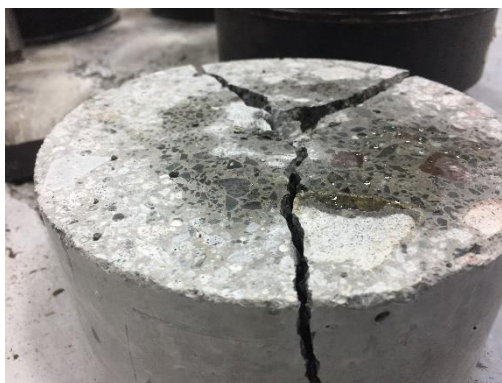
*Fotografía 24: Hormigón con
%Caucho Ensayado*



*Fotografía 25: Hormigón con
%Caucho Ensayado*



*Fotografía 26: Hormigón con
%Caucho Ensayado Falla:
Rotura*



Fotografía 27: Hormigón con %Caucho Ensayado Falla: Rotura

4.4. COSTOS

Basándose en los precios de mercado, manual de la CAMICON, análisis de precios unitarios de proyectos similares, se pueden obtener los siguientes precios comparativos entre hormigón reforzado con fibras, hormigón con caucho incorporado junto Sílica Fume como cementante y hormigón tradicional.

Tabla 19: Costo de Mezcla de Hormigón Convencional por m³

Material	Descripción	Unidad	P.U. [USD]	kg/m3	Costo [USD]
Acero de Refuerzo	Malla electrosoldada 5mm, 15x15, 2.40x6.25	m2	3,46		3,46
Agregado Fino	Piedra 9 Holcim	m3	14,40	751,40	4,35
Agregado Grueso	Piedra 7 Holcim	m3	15,54	517,86	3,31
Agua	Agua Potable	m3	1,00	248,44	0,25
Cemento	Cemento Selvalegre (50kg)	u	7,34	618,68	90,82
Piezas de Caucho	Recubrimiento de Caucho 50x50x13mm	m2	22,00		22,00
Total				2136,38	124,19

Tabla 20: Costo de Mezcla de Hormigón por m³ Reforzado con 1% de Fibras w/c = 0.35

Material	Descripción	Unidad	P.U. [USD]	kg/m3	Costo [USD]
Aditivo Plastificante	Glenium 3000 BASF	L	6,60	4,33	26,68
Agregado Fino	Piedra 9 Holcim	m3	14,40	750,62	4,34
Agregado Grueso	Piedra 7 Holcim	m3	15,54	517,32	3,31
Agua	Agua Potable	m3	1,00	245,15	0,25
Cemento	Cemento Selvalegre (50kg)	u	7,34	618,04	90,73
Fibras	Fibras Dramix 3D, ld = 0.6-0.8 (20kg)	kg	2,10	78,50	164,85
Total				2213,96	290,16

Tabla 21: Costo de Mezcla de Hormigón por m³ con Reemplazo de Agregado Fino por 7% de Partículas de Caucho, 10% Sílica Fume w/c = 0.40

Material	Descripción	Unidad	P.U. [USD]	kg/m3	Costo [USD]
Agregado Fino	Piedra 9 Holcim	m3	14,40	693,55	4,01
Agregado Grueso	Piedra 7 Holcim	m3	15,54	513,97	3,29
Agua	Agua Potable	m3	1,00	243,56	0,24
Caucho Fino	Reciclado de Caucho #30 TMN (25kg)	u	11,20	33,93	15,2
Caucho Grueso	Reciclado de Caucho #8 TMN (25kg)	u	10,92	18,27	7,98
Cemento	Cemento Selvalegre (50kg)	u	7,34	552,62	81,12
Sílica Fume	SikaFume, Aditivo en polvo con base Silice-Fume (15 kg)	u	41,68	61,40	170,61
Total				2117,30	282,45

Los resultados indican que el costo por metro cúbico, sin incluir la mano de obra y maquinaria, tanto para el hormigón reforzado con fibras como para el hormigón con partículas de caucho son elevados y sin una gran diferencia entre costos totales, a comparación del hormigón convencional que resulta ser el más económico inicialmente.

El hormigón tradicional al tener escasa resistencia a impactos, implica el uso de un recubrimiento de caucho, un elemento muy común en los pisos de los boxes de CrossFit. Este elemento de caucho amortigua hasta cierto grado la transmisión de energía a la losa de contrapiso, pero que de igual forma no evita el deterioro acelerado del hormigón por lo que el piso tiene que ser reparado en un periodo aproximado de 6 meses o derrocado cada 2-3 años por el grado de daño.

Considerando que el deporte genera alto impacto en la losa de contrapiso, el hormigón con reemplazo de caucho si bien mejora o alarga la vida útil del contrapiso, no es totalmente adecuado para este tipo de demanda si se quiere precautelar la inversión alta en la que se incurre cuando se cambia un piso de varios cientos de metros cuadrados, debido a que la falla se produce con la rotura del material al igual que el hormigón convencional. Por otro lado, según los resultados observados en este trabajo de titulación, el hormigón reforzado con fibras es mucho más eficiente al conservar su integridad y nivel de abrasión controlado, con una estimación de vida útil mayor a los anteriores.

Esta inversión es netamente a largo plazo, mientras que el hormigón con partículas de caucho incorporado y el hormigón tradicional tendrían que ser reemplazados por daños considerables en periodos de tiempo menores, es posible que el hormigón reforzado con fibras tenga una vida útil del doble de tiempo, lo que implica un ahorro en mantenimiento y reparación.

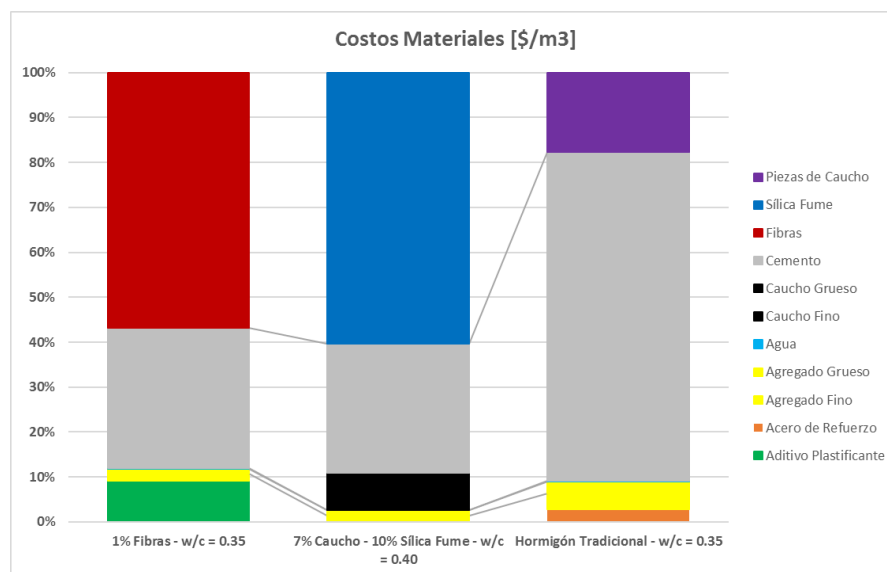


Gráfico 53: Costos de Materiales [\$/m3]

5. CASO DE APLICACIÓN

Una vez finalizada la investigación y escogida la dosificación de hormigón con el mejor desempeño ante impactos, se procedió a realizar la aplicación de la mezcla en una sección de losa de contrapiso de un box de CrossFit en la cual el hormigón tradicional existente ya ha cumplido su vida útil y se aprovechó para reemplazar el material.

El lugar de aplicación se encuentra ubicado en la vía Oswaldo Guayasamín E5-25 y Siena, específicamente dentro de La Tejedora Distrito Creativo. CrossFit Cumbayá se encuentra brindando sus servicios durante aproximadamente 5 años, el piso de hormigón ha sido protegido de los impactos constantes de los elementos pesados con piso de caucho de espesor de 1plg, lo cual ha ayudado a mantener la integridad del material durante varios

años pero que en ciertas zonas no ha sido suficiente y el hormigón tradicional ya ha fallado.



Fotografía 28: CrossFit Cumbayá, vista del piso de caucho de protección de 1''

La mezcla aplicada en el lugar fue el hormigón con un porcentaje de fibras del 1% y una relación $w/c = 0.35$, la cual fue colocada en el lugar de mayor daño y donde el hormigón ya no tiene capacidad de soportar cargas de impacto, generando molestia por el ahuellamiento existente.



Fotografía 29: Hormigón afectado por el impacto de elementos pesados

Una vez seleccionado el lugar de aplicación, se procedió a derrocar el material en una sección de dimensiones aproximadas de 60x90 [cm]. El tipo de losa existente en el lugar consta de un hormigón tradicional de 5[cm] de espesor sin malla electrosoldada y fundido sobre canto rodado de gran tamaño como material de mejoramiento del suelo, el

cual fue reciclado y usado nuevamente para mejorar la capacidad portante del suelo dejando una profundidad de 10 [cm] para la nueva losa de hormigón reforzado con fibras.



Fotografía 30: Zona derrocada de 60x90x10 [cm] con material de mejoramiento listo para recibir fundición de hormigón

La fundición de hormigón se la realizó con el mismo procedimiento de mezclado recomendado por la norma ASTM C31, considerando la adición de fibras de manera paulatina en la etapa final del mezclado. La mezcla de hormigón obtenida fue colocada en el lugar, dándole los acabados necesarios para su posteridad en el lugar.



Fotografía 31: Materiales usados para la fundición InSitu



Fotografía 32: Hormigón fundido InSitu



Fotografía 33: Hormigón con acabado realizado



Fotografía 34: Proceso de curado mediante el riego de agua

La aplicación de esta losa de hormigón reforzado con 1% de fibras y $w/c = 0.35$, quedará en futuras observaciones para evaluar el desempeño ante impactos en la vida real a lo largo del tiempo. Como punto de referencia se tendrá las zonas aledañas las cuales aún mantienen su integridad y que son sometidas a las mismas condiciones de cargas dinámicas diariamente.



Fotografía 35: Hormigón reforzado con 1% de fibras y $w/c = 0.35$ vs hormigón tradicional en zonas aledañas

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con el presente trabajo de investigación culminado, el cual tenía como objetivo dar solución al desgaste acelerado de losas de contrapiso de box de CrossFit con las mezclas realizadas con: hormigón reforzado con fibras y partículas de caucho con cementante adicional (Sílica Fume), se puede concluir lo siguiente:

- 1) Los resultados obtenidos para el hormigón reforzado con fibras antes cargas estáticas como cargas dinámicas, indican un desempeño superior comparado con el hormigón convencionalmente usado en este elemento estructural. La mezcla óptima que se piensa puede solucionar este problema es la adición de 1% máximo de fibras en la matriz del hormigón, ya que una cantidad mayor afecta la trabajabilidad considerablemente y el vibrado o varillado interno no es aceptable.
- 2) Para hormigones reforzados con fibras se puede notar también un aumento de la capacidad de deformación, volviéndolo un material dúctil y con control de abrasión manteniendo su integridad. El uso de fibras impide la propagación de fisuras en el interior del hormigón alargando su vida útil y resistencia.
- 3) El costo por m³ de hormigón reforzado con fibras es elevado, pero considerándolo como una inversión a largo plazo comparado con el hormigón tradicional, el cual tiene que ser reemplazado por fallo del material (rotura), resulta en un beneficio mayor por su capacidad de resistir la abrasión por impacto manteniendo su integridad estructural. Se recomienda para posibles aplicaciones futuras realizar un análisis de ciclo de vida de este hormigón para la aplicación mencionada.
- 4) La adición de partículas de caucho a la matriz del material incrementa notablemente la tenacidad del hormigón, pero reduce drásticamente las propiedades mecánicas del mismo facilitando la propagación de fisuras. Este efecto adverso fue contrarrestado en cierto grado con la ayuda de Sílica Fume

como cementante, teniendo éxito al obtener valores mayores en los ensayos de carga dinámica tanto como estática, pero de igual manera conforme aumenta la cantidad de reemplazo de agregado fino, el patrón de pérdida de resistencia se repite. La mezcla que se cree obtuvo un mayor desempeño es la que contiene un 7% de reemplazo de agregado fino por partículas de caucho y un 10% de Sílica Fume, superado este porcentaje de reemplazo el efecto de vacíos en el hormigón es notable en su baja resistencia.

- 5) De igual manera, el costo por m³ de esta dosificación es elevado, los resultados ante impactos son favorables, pero no se recomienda su uso debido al tipo de falla que posee, el material no es capaz de seguir soportando las solicitaciones de carga que exige el deporte de CrossFit una vez ocurrida la falla de rotura frágil del hormigón, comportamiento similar al hormigón convencional.
- 6) El hormigón con partículas de caucho presenta un comportamiento elástico, los módulos de elasticidad obtenidos se reducen conforme aumenta el reemplazo de agregado fino por este material de características resilientes. Pero debido a que las partículas no generan adherencia con la matriz del hormigón, este posee una tipología de falla similar a la del hormigón tradicional por rápida propagación de fisuras.
- 7) Conforme aumenta el porcentaje de reemplazo de agregado fino por partículas de caucho, la trabajabilidad se ve afectada ligeramente pero su compactación puede realizarse por vibrado interno sin problema.
- 8) Debido a la gran variabilidad en los resultados de ensayos a impactos, se recomienda el uso de un mayor número de especímenes para futuras investigaciones debido a la aleatoriedad de dispersión de fibras como de partículas de caucho en el medio de la pasta de hormigón.

- 9) La adición de fibras a la matriz del hormigón debe realizarse paulatinamente para evitar el fenómeno de fiber balling, que puede ocasionar pérdidas en la resistencia a la compresión por discontinuidades en el elemento.
- 10) Con la aplicación realizada en CrossFit Cumbayá, se pudo evidenciar el motivo de falla en la losa de contrapiso. Debido a que el lugar no fue considerado para la demanda de cargas dinámicas actuales, la losa de contrapiso cuenta a penas con 5 [cm] de espesor de hormigón sin mencionar la metodología y consideraciones antiguas de construcción. Con la mezcla aplicada en la zona afectada, se espera solucionar el problema a largo plazo en comparación con el hormigón tradicional en zonas aledañas, por lo que se realizarán observaciones futuras con el objetivo de medir un nivel de daño real.
- 11) Se recomienda el uso de un recubrimiento de protección sobre la losa de contrapiso para alargar el periodo de vida útil del elemento, evitando generar incomodidades por el ligero desprendimiento del material. Cabe recalcar que al mejorar el material reforzándolo con fibras metálicas y mejorando su desempeño ante impactos, es posible también disminuir el espesor de los recubrimientos de caucho que genera un impacto significativo en la economía.

7. REFERENCIAS

- ACI 544.1R-96 (1996) “*State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete*”
- ACI 544.2R-89 (1989) “*Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete*”
- ACI 544.3R-93 (1993) “*Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete*”
- ACI 544.4R (1988) “*Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete*”
- Alberti M.G., Enfedaque A., Gálvez J.C. (2017) “*Fibre reinforced concrete with a combination of polyolefin and steel-hooked fibres*” ELSEVIER
- ASTM C33/C33M – 13, (2013) “*Standard Specification for Concrete Aggregates*”
- ASTM C39/C39M – 18, (2018) “*Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*”
- ASTM C127 - 12 (2012) “*Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*”
- ASTM C128 – 01 (2001) “*Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate*”
- ASTM C136 – 06 (2006) “*Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*”
- ASTM C192/C192M-14 (2014) “*Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*”
- ASTM C469/C469M – 14 (2014) “*Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression*”
- ASTM C496/C496M – 17, (2017) “*Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*”
- ASTM C 566 – 97 (2004) “*Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*”

ASTM C1116/C1116M – 10a (2015) “*Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete*”

Aylie H., Okiyarta A. & A., (2015) “*Experimental study of steel-fiber reinforced concrete beams with confinement*” ELSEVIER.

Consuelo Criado M, Vera C, Downey P, Soto C, (2005) “*Influencia de la fibra de vidrio en las propiedades físico - mecánicas del hormigón*” recuperado el 16 de noviembre de 2018 desde:
<http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/viewFile/CRIADO/pdf>

Doo-Yeol Y & Nemkumar B, (2016) “*Mechanical properties of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete: A review*” ELSEVIER

El Comercio, (2019) “*Recicladora de llantas, bajo observación en Quito*” recuperado el 27 de marzo de 2019 desde: <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito-recicladora-llantas-barrio-neumaticos.html>

EMB Construcción (2006), “*Fibras en hormigones y morteros de cemento*” recuperado el 14 de enero de 2019 desde:
<http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=1535&srch=fibras en hormigones y morteros&act=4&tip=4>

Eren Ö, Marar K, & Çelik T, (2000) “*Effects of Silica Fume and Steel Fibers on Some Mechanical Properties of High-Strength Fiber-Reinforced Concrete*” recuperado el 15 de diciembre de 2018 desde:
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061897000585>

Harding, M. (S/F) “*Mezcla, colocación y acabado del concreto reforzado con fibra*” recuperado el 15 de diciembre de 2018 desde:
<http://www.imcyc.com/revista/1998/septiembre/mezcla.htm>

- Myers J. & Tinsley M. (2013) "*Impact Resistance of Blast Mitigation Material Using Modified ACI Drop-Weight Impact Test*" ACI MATERIALS JOURNAL, TECHNICAL PAPER
- Mahmoud, N. (2009), "*The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete*" ELSEVIER, Construction and Building Materials, rescatado el 12 de noviembre de 2018 desde: https://www.researchgate.net/publication/257388833_The_effects_of_silica_fume_and_polypropylene_fibers_on_the_impact_resistance_and_mechanical_properties_of_concrete
- Mohamed K. Ismail and Assem A. A. Hassan, (2016) "*Impact Resistance and Acoustic Absorption Capacity of Self-Consolidating Rubberized Concrete*" ACI Materials Journal, Title No. 113-M66
- Muñoz, F. (2011) "*Comportamiento Mecánico del Hormigón Reforzado con Fibra de Polipropileno Multifilamento: Influencia del Porcentaje de Fibra Adicionado*" recuperado el 16 de enero de 2019 desde:
- Najib N., Camille A., Samer A. (2018) "Rubber concrete: Mechanical and dynamical properties" ELSEVIER, Case Studies in Construction Materials
- Puertas F, Amat T, Vazquet. (2000) "*Comportamiento de morteros de cementos alcalinos reforzados con fibras acrílicas y de polipropileno*", España, recuperado el 15 de enero de 2019 desde: <http://digital.csic.es/handle/10261/35000>
- Rodríguez de Sensale G. et. al. (2017) "*Hormigón autocompactante con fibras para premoldeados*" ACHE.
- Zhang, L. (2008), "*IMPACT RESISTANCE OF HIGH STRENGTH FIBER REINFORCED CONCRETE*", University of British Columbia, recuperado el 14

de febrero de 2019 desde:

<https://open.library.ubc.ca/cIRcle/collections/ubctheses/24/items/1.0063072>

Zhang, M. Shim, V. Lu, G. Chew, C. (2003) “*Resistance of high-strength concrete to projectile impact*” ELSEVIER, Construction and Building Materials, rescatado el

12 de enero de 2019 desde:

<http://www.ciar.org/ttk/mbt/papers/ijie02/armor.x.ijie.vol31.pp825->

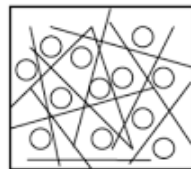
841.resistance_of_high_strength_concrete_to_projectile_impact.zhang_shim_lu_chew.2004.pdf

8. ANEXOS

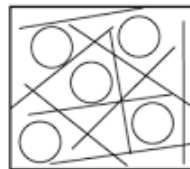
8.1. IMÁGENES



Anexo 1: Fiber Balling.



Árido de 5mm



Árido de 10mm



Árido de 20mm

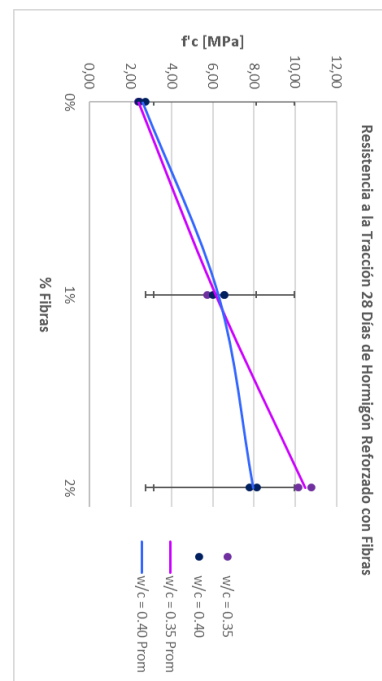
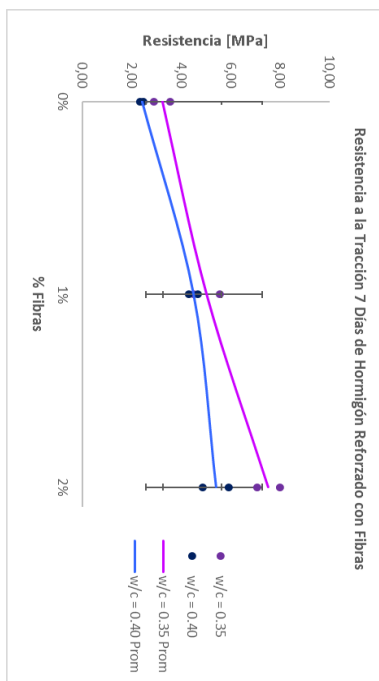
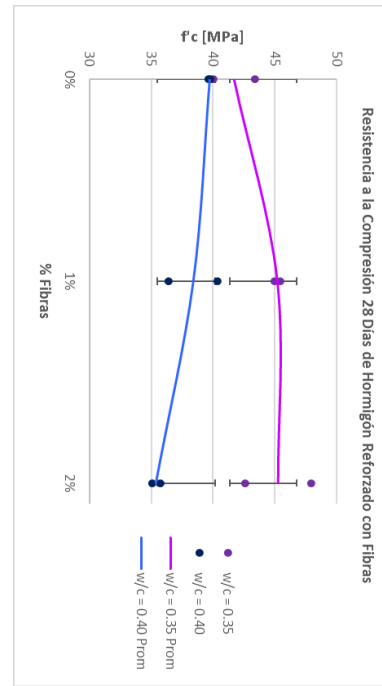
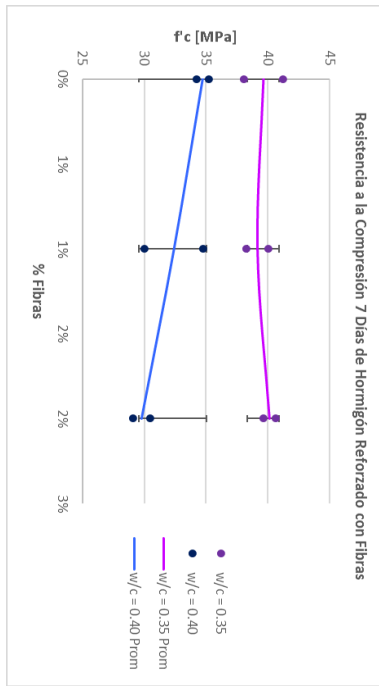
Anexo 2: Influencia Tamaño del Agregado en Distribución de Fibras.



Anexo 3: Fiber Balling %Fibras = 2%

8.2. GRÁFICAS

8.2.1. DESVIACIONES ESTÁNDAR HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS METÁLICAS



8.2.2. DESVIACIONES ESTÁNDAR HORMIGÓN CON PARTÍCULAS DE CAUCHO Y SÍLICA FUME COMO CEMENTANTE

