



**Facultad de Ingeniería  
Escuela de Construcción Civil**

**Influencia de la incorporación de fibras poliolefinicas sobre las resistencias mecánicas de hormigones con árido reciclado.**

**Por**

**Thian Yssavo Ahumada Carrasco**

Tesis para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Construcción y al Título de Ingeniero Constructor

**Profesor Guía: Juan Eduardo Egaña Ramos**

JUNIO, 2016



**Facultad de Ingeniería  
Escuela de Construcción Civil**

**Influencia de la incorporación de fibras poliolefinicas sobre las resistencias mecánicas de hormigones con árido reciclado.**

**Por**

**Thián Yssavo Ahumada Carrasco**

Tesis para optar al Grado de Licenciado en Ciencias de la Construcción y al Título de Ingeniero Constructor

**Profesor Guía: Juan Eduardo Egaña Ramos**

MAYO, 2016

## *Dedicatoria*

*A mis Padres, Quienes son los pilares  
fundamentales en mi vida, que me han brindado  
todo lo necesario y más para llegar donde estoy,  
por su amor eterno, por su apoyo incondicional y  
Por siempre creer y confiar en mí.*

## ***Agradecimientos***

*A Dios, por brindarme a oportunidad de obtener otro triunfo más, por bendecirme todos estos años, por darme una gran familia y ponerme gente tan extraordinaria en mi vida.*

*Quisiera agradecerles a los asesores académicos de la Universidad de Valparaíso, a mi profesor guía Juan Egaña, por su dedicación, por su entrega, su sabiduría y todo el tiempo invertido en mí.*

*Como no olvidar a la Empesita, por su cariño demostrado día a día, gracias por cada momento que la necesite, agradecido eternamente.*

*A mi familia, Ahumada, Carrasco, por su apoyo, su preocupación y cariño incondicional que me han demostrado a lo largo de todos estos años. Gracias a todos, a mis abuelos, tíos, primos, por demostrarme que siempre se puede contar con ellos en lo que sea. Gracias a cada uno de ustedes por estar presente, y tenerlos a mi lado.*

*Tengo que agradecer y muy orgullosamente a mis padres Sandra, Oscar, por apoyarme en todo momento, por abrazarme, por amarme, por cuidarme, por hacer muy bien su labor como padres, sin ustedes este camino sería distinto, por ser tan buenos formadores conmigo como mis hermanos, gracias por todo lo que me dan y hacer todo lo que este a su alcance para que seamos felices, por esto y mucho mas, Debo agradecer también a mis hermanos Oscar, por sus buenos consejos y por creer siempre en mí y especialmente a mi hermanita Yan por demostrarme tanto su cariño, los amo.*

*A mis Amigos de universidad, a tantos que pasaron por este largo camino, especialmente mis compadres Nacho y Benz, gracias por su apoyo, por sus concejos y por acompañarme en este largo camino, solo me queda decir que me llevo a dos hermanos.*

*A todos mis amigos de Mosella, que por culpa de ellos deje de estudiar para varios exámenes, pero sé que no me obligaban, si no que yo quería estar con ustedes, gracias por su apoyo que fue demostrado en cada momento a lo largo de estos 21 años que llevamos juntos, más que amigos una familia.*

*Agradecer también a mis suegros, por acompañarme en estos últimos años, por su poyo, y cariño demostrado. Como también al Tio Alejandro por sus conocimientos y apoyo en todo momento, y a la tia Fabiola por su cariño entregado.*

*Y para terminar, la persona más importante, Carolina Tricot, amor gracias por aparecer en mi vida y estar absolutamente en todo, gracias por apoyarme en cada momento que lo necesite, por la confianza, por darme animo en los momentos más difíciles, por las alegrías que me das en cada momento, por compartir todo, por ser tu compañero de vida, por cuidarme, por amarme, por estar en las buenas y en la malas, por la fuerza que me das para avanzar obstáculos imposibles, que solo con tu ayuda y juntos vamos a superar, Gracias por todo mi vida. TE AMO.*

## ÍNDICE

<b>LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS</b> .....	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>8</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>9</b>
<b>ÍNDICE DE GRAFICOS</b> .....	<b>10</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>11</b>
<b>CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES</b> .....	<b>14</b>
1.1. INTRODUCCIÓN:.....	14
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN: .....	16
1.2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	16
1.3. HIPÓTESIS.....	17
1.4. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN:.....	18
1.5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
1.6. ESTRUCTURA DE TESIS.....	20
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>22</b>
2.1 HORMIGÓN RECICLADO.....	22
2.1.1. RECICLAJE DEL HORMIGÓN. ....	22
2.1.2. PROCESO DEL ÁRIDO RECICLADO. ....	23
2.1.3. CARACTERÍSTICAS DEL ÁRIDO RECICLADO. ....	24
2.1.3.1. MORTERO ADHERIDO.....	24
2.1.3.2. GRANULOMETRÍA.....	25
2.1.3.3. FORMA Y TEXTURA SUPERFICIAL.....	25
2.1.3.4. DENSIDAD.....	26
2.1.3.5. ABSORCIÓN.....	26
2.1.3.6. RESISTENCIA A LA FRAGMENTACIÓN.....	27
2.1.3.7. CONTENIDOS DE CLORUROS .....	28
2.1.3.8. CONTAMINANTES E IMPUREZAS .....	28
2.1.3.9. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	28
2.2. ESTRUCTURA DEL HORMIGÓN. ....	29
2.2.1. ÁRIDOS.....	29
2.2.2. MATERIALES CEMENTÍCIOS.....	30
2.2.3. MICRO ESTRUCTURA: ZONA DE CONTACTO CEMENTO/ÁRIDO.....	31
2.3. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN. ....	31
2.3.1. DURABILIDAD. ....	31
2.3.2. DOCILIDAD.....	31

2.3.3.	PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN.....	32
2.3.3.1.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	32
2.3.3.2.	RESISTENCIA A LA FLEXOTRACCIÓN.....	34
2.3.4.	ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN.....	35
2.3.5.	ENSAYO A COMPRESIÓN MEDIANTE EL CUBO MODIFICADO .....	37
2.4.	HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRA.....	39
2.4.1.	TIPOS DE FIBRAS APROPIADAS PARA HORMIGONES.....	39
2.4.1.1.	FIBRA DE VIDRIO.....	40
2.4.1.2.	FIBRAS DE ACERO.....	42
2.4.1.3.	FIBRAS ACRÍLICAS.....	43
2.4.1.4.	FIBRAS DE ARAMIDA .....	44
2.4.1.5.	FIBRAS DE CARBONO .....	44
2.4.1.6.	FIBRAS DE NYLON .....	45
2.4.1.7.	FIBRAS DE POLIÉSTER.....	45
2.4.1.8.	FIBRAS MACRO-SINTÉTICAS.....	45
2.4.1.9.	POLIPROPILENO.....	46
2.4.1.10.	POLIOLEFINA IMPREGNADA CON RESINA.....	47
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>49</b>
3.1.	ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	49
3.1.3.	FACTORIAL DE EXPERIMENTO.....	50
3.2.	DESARROLLO ESTUDIO EXPERIMENTAL.....	53
3.2.1.	GENERALIDADES.....	53
3.2.2.	ESTUDIO MATERIAL.....	54
3.2.2.1.	TRITURACIÓN DEL MATERIAL.....	54
3.2.2.2.	SELECCIÓN FRACCIÓN GRUESA.....	54
3.2.2.3.	PROPIEDADES DEL ÁRIDO A CONTROLAR.....	54
3.2.2.4.	EXTRACCIÓN Y PREPARACIÓN DE MUESTRAS.....	54
3.2.2.5.	TAMIZADO Y DETERMINACIÓN DE GRANULOMETRÍA.....	55
3.2.2.6.	DETERMINACIÓN DEL MATERIAL FINO MENOR A 0.080 MM.....	61
3.2.2.7.	DETERMINACIÓN DE LAS DENSIDADES REAL, NETA Y LA ABSORCIÓN DE AGUA.....	62
3.2.2.7.1.	DETERMINACIÓN DE LAS DENSIDADES REALES, NETAS Y ABSORCIÓN DE AGUA DE LAS ARENAS.....	62
3.2.2.7.2.	DETERMINACIÓN DE LAS DENSIDADES REALES, NETAS Y ABSORCIÓN DE AGUA DE LAS GRAVAS.....	63
3.2.2.8.	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE GRAVAS RECICLADAS.....	64
3.3.	DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES.....	66
3.3.1.	DOSIFICACIÓN HORMIGÓN H20.....	66

3.3.2.	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA MEDIA REQUERIDA.....	66
3.3.3.	DETERMINACIÓN DOSIS DE CEMENTO .....	67
3.3.4.	DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE AGUA DE AMASADO .....	68
3.3.5.	DETERMINACIÓN DEL PESO DEL HORMIGÓN.....	68
3.3.6.	DETERMINACIÓN DEL PESO TOTAL DE ÁRIDOS. ....	69
3.3.7.	DOSIFICACIÓN POR M <sup>3</sup> HORMIGÓN.....	69
3.3.8.	DOSIFICACIÓN FINAL.....	69
3.4.	ELABORACIÓN DE HORMIGONES.....	71
3.4.1.	PROGRAMACIÓN DE LAS AMASADAS.....	71
3.4.2.	MEZCLADO.....	72
3.4.3.	DOCILIDAD DEL HORMIGÓN .....	73
3.4.4.	CONFECCIÓN Y CURADO DE PROBETAS EN LABORATORIO .....	75
3.4.5.	ENSAYOS .....	77
3.4.5.1.	ENSAYO DE TRACCIÓN POR FLEXIÓN (NCH 1038 OF 77) .....	77
3.4.5.2.	ENSAYO A COMPRESIÓN .....	79
	<b>CAPÍTULO IV, PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS. ....</b>	<b>82</b>
4.1.	ENSAYOS DE ASENTAMIENTO .....	82
4.2.	DENSIDAD APARENTE .....	83
4.3.	ENSAYO A FLEXOTRACCIÓN.....	84
4.3.1.	RESULTADOS.....	84
4.4.	ENSAYO A COMPRESIÓN.....	89
4.4.1.	RESULTADOS.....	89
	<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.....</b>	<b>95</b>
	<b>CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFIA. ....</b>	<b>98</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>100</b>

**LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS.**

cm	=	Centímetros
cm <sup>2</sup>	=	Centímetros cuadrados
°C	=	Grados Celsius
G	=	Gramos
IDIEM	=	Instituto de Investigación y Ensayos de Materiales
kg	=	Kilogramos
kgf	=	Kilogramos fuerza
m <sup>3</sup>	=	Metros cúbicos
mm	=	Milímetros
NCh	=	Norma chilena
Of	=	Oficial
%	=	Por ciento
”	=	Pulgadas
seg	=	Segundos
ITZ	=	Zona de transición interfacial

## ÍNDICE DE TABLAS

### **CAPÍTULO II: Marco Teórico**

TABLA 1: Clasificación de los hormigones por resistencia a compresión.....	33
TABLA 2: Clasificación de los hormigones por resistencia a flexotracción .....	34
TABLA 3: Aplicación de la carga. ....	35
TABLA 4: Propiedades técnicas de las fibras de vidrio. ....	41
TABLA 5: Propiedades técnicas de las fibras de acero .....	42
TABLA 6: Propiedades técnicas de las fibras de carbón .....	44
TABLA 7: Propiedades técnicas de las fibras de polipropileno .....	46

### **CAPÍTULO III: Desarrollo de la Investigación**

TABLA 8: Combinación de niveles para cada factor .....	51
TABLA 9: Especificaciones de Fibra Barchip R50.....	51
TABLA 10: Granulometría de la Arena.....	56
TABLA 11: Granulometría de la grava natural 20 mm .....	57
TABLA 12: Granulometría de la grava reciclada 20 mm .....	58
TABLA 13: Resumen de Granulometrías de Áridos .....	59
TABLA 14: Granulometría con distintos porcentajes de áridos reciclados .....	61
TABLA 15: Resultado ensayo material fino menor a 0.080 mm arena. ....	61
TABLA 16: Resultado ensayo material fino menor a 0.080 mm Grava. ....	62
TABLA 17: Resultado ensayo material fino menor a 0.080 mm Grava reciclada. ....	62
TABLA 18: Resultados ensayo densidades reales, netas, y absorción de agua de la arena.....	63
TABLA 19: Resultados ensayo densidades reales, netas y absorción de la grava natural. ....	63
TABLA 20: Resultados ensayo densidades reales, netas y absorción de la grava reciclada. ....	64
TABLA 21: Resultado del ensayo del desgaste de los ángeles de las gravas recicladas. ....	65
TABLA 22: Factor estadístico t.....	66
TABLA 23: Determinación dosis de cemento.....	67
TABLA 24: Determinación de la cantidad de agua. ....	68
TABLA 25: Dosificación por m <sup>3</sup> hormigón. ....	69
TABLA 26: Dosificación de hormigón con 0% de Grava reciclada. ....	69
TABLA 27: Dosificación de hormigón con 25% de árido reciclado.....	70
TABLA 28: Dosificación de hormigón con 50% de árido reciclado.....	70
TABLA 29: Dosificación de hormigón con 100% de árido reciclado.....	70
TABLA 30: Programación de amasadas. ....	71

### **CAPÍTULO IV: Presentación y análisis de resultados.**

TABLA 31: Resultados generales ensayo asentamiento.....	82
TABLA 32: Resultados generales Densidades a Parente Promedio.....	83
TABLA 33: Resistencia a la flexotracción a los 28 días, con 0% de árido grueso.....	84
TABLA 34: Resistencia a la flexotracción a los 28 días, con 25% de árido grueso.....	85
TABLA 35: Resistencia a la flexotracción a los 28 días, con 50% de árido grueso.....	86
TABLA 36: Resistencia a la flexotracción a los 28 días, con 100% de árido grueso.....	87
TABLA 37: Resultados generales Resistencia a la flexotracción a los 28 días. ....	88
TABLA 38: Resistencia a la compresión a los 28 días, con 0% de árido grueso. ....	89
TABLA 39: Resistencia a la compresión a los 28 días, con 25% de árido grueso.....	90
TABLA 40: Resistencia a la compresión a los 28 días, con 50% de árido grueso.....	91
TABLA 41: Resistencia a la compresión a los 28 días, con 100% de árido grueso.....	92
TABLA 42: Resultados generales Resistencia a compresión a los 28 días. ....	93

## ÍNDICE DE FIGURAS

### **CAPÍTULO II: Marco teórico**

FIGURA 1: Proceso de obtención de árido reciclado. ....	24
FIGURA 2: Zonas de Transición Interfacial. ....	27
FIGURA 3: Fibras de vidrio. ....	41
FIGURA 4: Fibra de Acero. ....	43
FIGURA 5: Fibras Acrílicas. ....	43
FIGURA 6: Fibras de Aramida. ....	44
FIGURA 7: Fibra de Carbono. ....	45
FIGURA 8: Fibra de Polipropileno (Forta-Ferro). ....	46
FIGURA 9: Fibra de Poliolefina (Barchip R50). ....	47

### **CAPÍTULO: Desarrollo de la Investigación**

FIGURA 10: Fibra de Poliolefina (Barchip R50). ....	52
FIGURA 11: Cemento la Unión. ....	52
FIGURA 12: Horno utilizado para Secado de muestras. ....	55
FIGURA 13: Acopio de grava reciclada. Fuente: Elaboración propia ....	55
FIGURA 14: Tamices utilizados para análisis granulometría. ....	59
FIGURA 15: Instrumento utilizado en el desgaste de los ángeles. ....	65
FIGURA 16: Betonera eléctrica. ....	72
FIGURA 17: Cono de Abrams. ....	74
FIGURA 18: Probetas prismáticas ....	75
FIGURA 19: Cámara de curado. ....	76
FIGURA 20: Ensayo a flexotracción. ....	78
FIGURA 21: Momento de rotura del Ensayo a flexotracción. ....	78
FIGURA 22: Ensayo a compresión mediante el cubo modificado. ....	80
FIGURA 23: Prensa de ensayos ....	80

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

### **CAPÍTULO III: Desarrollo de la investigación**

GRÁFICO 1: Curva granulométrica de la Arena. ....	56
GRÁFICO 2: Curva granulometría de la grava natural 20mm. ....	57
GRÁFICO 3: Curva Granulometría de la grava reciclada 20mm. ....	58

### **CAPÍTULO IV: Presentación y análisis de resultados**

GRÁFICO 4: Representación gráfica resultados asentamiento .....	82
GRÁFICO 5: Variación de densidad aparente, con 0% árido grueso reciclado.....	83
GRÁFICO 6: Variación de resistencia a flexotracción, con 0% árido grueso reciclado.....	84
GRAFICO 7: Variación de resistencia a flexotracción, con 25% árido grueso reciclado.....	85
GRÁFICO 8: Variación de resistencia a flexotracción, con 50% árido grueso reciclado.....	86
GRÁFICO 9: Variación de resistencia a flexotracción, con 100% árido grueso reciclado.....	87
GRÁFICO 10: Resumen de la resistencia a la flexotracción. ....	88
GRÁFICO 11: Variación de resistencia a compresión, con 0% árido grueso reciclado. ....	89
GRÁFICO 12: Variación de resistencia a compresión, con 25% árido grueso reciclado. ....	90
GRÁFICO 13: Variación de resistencia a compresión, con 50% árido grueso reciclado. ....	91
GRÁFICO 14: Variación de resistencia a compresión, con 100% árido grueso reciclado. ....	92
GRÁFICO 15: Resumen de la resistencia a la comprensión.....	93

## RESUMEN

En el presente trabajo se estudió la influencia que genera las dosis variables de fibras poliolefinicas sobre las resistencias mecánicas de hormigones fabricados con áridos reciclados.

En la investigación se confeccionaron hormigones patrón de 0, 25, 50 y 100% de árido grueso reciclado, los cuales no contienen fibra. Luego a este mismo diseño se le agregaron distintos porcentajes de fibras. Las dosis de fibra que se aplicaron fueron de 3, 6 y 9 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Con cada hormigón se fabricaron 3 vigas para ensayos a flexotracción y a compresión mediante el cubo modificado, todas a 28 días, el asentamiento propuesto fue de 6±2. Las propiedades del hormigón que se estudiaron en estado fresco fue el asentamiento, y en estado endurecido fueron la densidad y las resistencias a la flexotracción y a compresión.

Del análisis de los resultados de la presente investigación unido a la investigación bibliográfica, el contenido óptimo de fibras poliolefinicas es de 6 kg/m<sup>3</sup>.

Palabras claves: *Árido reciclado, Fibras poliolefinicas, asentamiento, resistencia flexotracción, resistencia compresión.*

**ABSTRACT**

In this paper the influence generated by the varying doses of polyolefin fibers on the mechanical strength of concrete made with recycled aggregates was studied.

In research concrete pattern 0, 25, 50 and 100% recycled coarse aggregate, which do not contain fiber were produced. Then to this same design they were added different percentages of fiber. Doses applied were fiber 3, 6 and 9 kg / m<sup>3</sup> respectively. 3 beams with each concrete for testing flexural and compressive were fabricated by the modified cube, all at 28 days, the proposed settlement was  $6 \pm 2$ . Concrete properties that were studied in fresh state was the settlement, and were cured state density and resistance to compressive and bending strength.

Analysis of the results of this investigation together with the bibliographic research, the optimum content of polyolefin fibers is 6 kg / m<sup>3</sup>.

*Keywords: Barren recycled, polyolefin fibers, settlement, flexural strength, compressive strength.*

## *Capítulo I*

# *Antecedentes Generales*

## CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES.

### 1.1. Introducción:

El hormigón o también llamado concreto en algunos países, es el material manufacturado más utilizado en la construcción, resulta la mezcla de uno o más conglomerantes, con áridos, agua y eventualmente, aditivos y adiciones. [1]

El hormigón es uno de los materiales más ampliamente utilizado en la construcción, pero también es el generador de grandes volúmenes asociados a los procesos de demolición y desperdicio. En el mejor de los casos, estos residuos van a parar a un vertedero autorizado, con el consiguiente impacto ambiental y social importante, que repercute significativamente en la calidad de vida de una región. [2]

La búsqueda de composiciones alternativas de hormigón puede tener también una base completamente diferente, en muchos países se imponen ahora restricciones sobre la extracción de grava y arena para el hormigón. Hay entonces mucho interés en el uso de materiales reciclados. [3] La necesidad de reciclar los escombros que produce la industria de la construcción está tomando hoy en día gran importancia, debido a la necesidad de disponer terrenos para su vertimiento, como también el alto costo que implica su manejo. [4] La gran demanda de recursos básicos ha generado una gran escasez de materias primas, constituyendo una gran preocupación, sumando a esto la motivación que existe de preservar y proteger el medio ambiente de un inminente desequilibrio ecológico. [5] Otro punto importante a considerar es la reducción de extracción de materiales pétreos de los entornos naturales, disminuyendo el impacto ambiental y el rápido agotamiento de las reservas naturales provenientes tanto de cauces como de canteras. [6]

La cantidad de residuos generados en Chile, según estimaciones para el periodo 2000 - 2009, presenta un crecimiento variable debido, principalmente, al aumento de la población y crecimiento de producción industrial. La cantidad generada de residuos en el periodo 2000-2009 ha experimentado un crecimiento estimado del 42 %. [7], por esto se ha buscado maneras de optimizar el reciclaje.

El hormigón es el material en la construcción más extensamente utilizado debido a varias razones, primero, porque posee una gran resistencia a la acción del agua sin sufrir un serio deterioro, además de que puede ser moldeado para dar una gran variedad de formas y tamaños gracias a la trabajo de la mezcla.[1]

Durante el proceso de fraguado y endurecimiento del hormigón ocurre un cambio de volumen conocido como contracción por secado, esta contracción se debe principalmente a la pérdida de humedad durante el fraguado. Los efectos de la contracción y las restricciones del hormigón provocan esfuerzos de tensión y, por consiguiente agrietamiento, sin embargo el uso de fibras distribuidas aleatoriamente ha demostrado ser un método efectivo para controlar la formación de grietas en el hormigón. [8]

Estas fibras pueden alterar significativamente la contracción libre del hormigón, pero pueden aumentar considerablemente la resistencia al agrietamiento.

Se denomina hormigón reforzado con fibras a la mezcla de cemento, grava, arena, agua y fibras discretas discontinuas.

La aparición en el mercado de nuevos tipos de fibras y su utilización para el refuerzo de hormigones, permite mejorar, muy notablemente, su calidad, sus propiedades y su comportamiento a los esfuerzos y a las deformaciones que se generan en el terreno durante la construcción de diferentes obras. [9]

Esta investigación consiste en determinar la influencia de fibras de poliolefina en las resistencias mecánicas, con distintos porcentajes de árido reciclado, este tipo de fibra se fabrica a partir del polipropileno y polietileno de muy alta calidad, que es impregnada con una capa de resina. La fibra tiene un perfil corrugado que favorece muy notablemente su trabazón con el hormigón.

Todos estos antecedentes previos, ayudarán a que este trabajo de investigación, se desarrolle de la mejor manera posible, debido a que se tienen diversas posturas y experiencias de distintas índoles, con respecto a utilizar fibras en el hormigón hecho con árido reciclado. Se espera obtener buenos resultados, partiendo por la conservación de los recursos naturales, también la disminución de los productos de las demoliciones de hormigón sin uso en los vertederos, considerando que estos elementos por su composición poseen un peso considerable, difícil de deshacerse fácilmente.

**1.2. Objetivos de la investigación:**

Determinar la influencia sobre las resistencias mecánicas de hormigones fabricados con árido reciclado al incorporar dosis variables de fibras poliolefinicas.

**1.2.1. Objetivos Específicos:**

Determinar el efecto de la incorporación de fibras poliolefinicas sobre las siguientes propiedades de hormigones fabricados con árido reciclado:

- ✓ Docilidad (asentamiento) y eventual demanda de agua de amasado.
- ✓ Resistencias a flexotracción y a compresión.
- ✓ Densidad aparente del hormigón endurecido

### **1.3. Hipótesis**

La incorporación de fibras poliolefinicas al hormigón con árido reciclado permite incrementos de sus resistencias mecánicas.

#### 1.4. Alcances de la investigación:

- El cemento a utilizar será Portland – Puzolánico grado corriente, con grava de 20 mm, arena de tamaño nominal 5mm. Se confeccionaran remplazos de árido convencional por árido grueso reciclado en 0% 25% 50% y 100%
- La fibra sintética estructural a utilizar se denomina “fibra Barchip R50” proporcionada por la empresa EPC CHILE S.A.
- Se agregarán distintos porcentajes de fibras. Las dosis de fibra que se aplicaran serán de 3, 6 y 9 kg/m<sup>3</sup> respectivamente.
- El árido reciclado de tamaño máximo nominal 20 mm, será recolectado con anterioridad proveniente de Postes en demolición, para obtener un abastecimiento necesario para realizar las probetas de hormigón. Solo se implementara grava reciclada, no se incluirá arena reciclada.
- Los ensayos de resistencia mecánica, para la compresión y flexotracción, se regirán según las normas NCh 1037 Of 2009 y NCh 1038 Of 2009 respectivamente.
- Los ensayos y controles se realizaran con instrumentos calibrados en los laboratorios de hormigón de la Universidad de Valparaíso.

### 1.5. Metodología de la investigación.

La metodología para este trabajo de investigación se inicia con un estudio bibliográfico, con el objetivo de recopilar la información necesaria de diversos investigadores, que estudiaron temas similares y lograron llegar a conclusiones que pueden ser de gran utilidad para este proyecto de tesis. Obtenido esta información previa, nos permite desarrollar la fase experimental de la investigación, la que dará respuesta a nuestros objetivos planteados previamente.

En primer lugar se confeccionarán hormigones patrón de 0,25, 50 y 100% de árido reciclados, los cuales no contienen fibra. Luego a este mismo diseño se le agregaran distintos porcentajes de fibras. Las dosis de fibra que se aplicaran serán de 3, 6 y 9 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Con cada hormigón se fabricara 3 vigas para ensayos a flexotracción y a compresión mediante del cubo modificado, todas a 28 días.

La confección de probetas se realizara de acuerdo a la normativa chilena NCh1017. Para la confección del hormigón para las probetas se utilizará una betonera.

Las dimensiones de las probetas serán de acuerdo a la normativa chilena NCh1017

Ensayos a realizar:

- ✓ Asentamiento, observación del aspecto del hormigón y evaluación de la eventual variación de la demanda de agua de amasado para mantener un asentamiento más o menos constante.
- ✓ Resistencias a flexotracción y a compresión.
- ✓ Densidad aparente.

Después de cada ensayo se documentara y procesara los datos obtenidos de estos.

Se analizan los datos tomados en los ensayos, se compara las probetas con la incorporación de fibras, con los datos del hormigón reciclable en sus distintos porcentajes

Al final de cada ensayo se procederá a la comparación de estos y la obtención de conclusiones.

El tiempo total del estudio estará determinado por los ensayos que se realizaran en laboratorio. Luego de efectuar dichos ensayos se estima que se necesitara 1 mes más aprox. para realizar el análisis y comparación de los datos obtenidos, para luego finalizar el estudio con un análisis completo y obtención de conclusiones.

## **1.6. Estructura de tesis.**

Se compone de los siguientes capítulos:

**CAPÍTULO I:** Antecedentes generales, se definen los objetivos, hipótesis, alcance y metodología de investigación.

**CAPÍTULO II:** Marco teórico.

**CAPÍTULO III:** Desarrollo de la investigación. Diseño y experiencia en laboratorio.

**CAPÍTULO IV:** Presentación y análisis de resultados. Obtención de datos y análisis de resultados de los ensayos realizados en el laboratorio.

**CAPÍTULO V:** Conclusiones.

## *Capítulo II*

### *Marco Teórico*

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.

### 2.1 Hormigón reciclado.

#### 2.1.1. Reciclaje del hormigón.

La construcción es una industria que busca la tendencia de la preservación y la protección del medio ambiente, de manera sustentable y por lo mismo se considera, cada vez más, tomar las medidas pertinentes para lograr una producción más amigable con el Medio Ambiente.

Siendo el hormigón el material más ampliamente utilizado en el área de la construcción, es natural que la idea de reciclarlo apareciera como una necesidad para la viabilidad ecológica del rubro; luego, la idea de reciclarlo como árido en nuevo hormigón surgió como parte de una solución prometedora para preservar el Medio Ambiente. Hoy en día, se ha vuelto una realidad factible, con la participación de toda la industria cementera, para ser parte de un desarrollo sustentable.

La experiencia de los países europeos, norte américa y de algunos países asiáticos, donde ya se recicla gran parte del hormigón, existiendo normativas y reglas de uso, es amplia y puede servir para promover este uso acá en Chile: con residuos utilizables en geotecnia, carreteras o en estructuras.

Existe una razón principal impulsando el reciclaje del hormigón. Las cantidades de hormigón usado que van a botadero son muy importantes; además, la falta de organización y de cuidado en la construcción conduce a este desperdicio de hormigón: según un estudio de la Pontificia Universidad Católica, aproximadamente 30% de los materiales se desperdician al construir [10]. Luego, para aprovechar este recurso y no dejar que se pierda tanto material y tanto espacio, la reutilización del hormigón como árido parece muy adecuada.

Sin embargo, es necesario destacar que el reciclaje del hormigón tiene poco impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero puesto que la mayoría de las emisiones se generan al producir el cemento, que no puede ser reciclado. De esta forma, los principales efectos del reciclaje del hormigón están orientados a la disminución de la explotación de los recursos naturales, a la disminución de la utilización de tierras como botaderos y a un mejor control de los costos asociados al transporte de las materias primas. Ahora bien, a parte del reciclaje de hormigón usado, también existe la posibilidad de reutilizar el hormigón fresco no usado (lo que se devuelve a la planta de mezcla), con equipos adecuados en los sitios de producción. Hoy en día, más de 125 mil millones de toneladas de hormigón fresco devuelto se generan cada año en el mundo [11].

### 2.1.2. Proceso del árido reciclado.

El reciclaje del hormigón usado consiste en romper el hormigón existente, traerlo a una planta adaptada, luego triturarlo y usarlo como árido en la nueva pasta de cemento. Su uso predominante es en sub-base de pavimento, como agregado pétreo, pero también se puede usar en nuevo hormigón, que sea estructural o no.

Si los escombros de hormigón provienen de hormigón armado, es necesario hacerle un tratamiento específico al quitar las armaduras, lo que vuelve el proceso bastante más caro. Es por esta razón económica que se puede reciclar en prioridad hormigón no armado usado en pavimentos u otros. Luego, el hormigón solo se procesa en una planta chancadora que lo tritura para llegar a un tamaño aceptable, según los requisitos exigidos.

A continuación se presenta un ejemplo del proceso de fabricación de áridos reciclados.



1. Selección de los productos en obras



2. Tratamiento y preparación de los materiales previa a la trituración



3. Selección manual



4. Separación de los fierros



5. Trituración



6. Chancador



7. Almacenamiento de los materiales



8. Carga y despacho de los materiales

FIGURA 1: Proceso de obtención de árido reciclado.

El uso predominante de los áridos hechos a partir de hormigón reciclado es como reemplazo parcial o total del árido grueso, sea éste grava o gravilla; se usa poco como parte del árido fino, debido a su gran demanda de agua. [18]

### 2.1.3. Características del árido reciclado.

Hoy en día las propiedades principales de los áridos reciclados procedentes de hormigón son bastante conocidas, ya que se han hecho varios estudios sobre el tema.

#### 2.1.3.1. Mortero Adherido

La principal diferencia entre los áridos reciclados y los áridos naturales, es la cantidad de mortero adherido que incorporan los primeros debido al hormigón original del que proceden. La cantidad de mortero adherido hace que los áridos reciclados presenten propiedades distintas a los naturales que se reflejan en un aumento de la absorción de agua, menor densidad, menor

resistencia, menor dureza y menor dureza a la fragmentación. El hormigón fabricado con ellos estará directamente condicionado por dichas propiedades.

No existe un procedimiento normalizado para evaluar estas cantidades aunque suelen emplearse métodos que tratan de eliminarlo de la superficie el árido original, mediante diferencia de pesadas antes y después de su eliminación, establecer un porcentaje en peso que corresponde al mortero adherido.

### **2.1.3.2. Granulometría**

La granulometría del árido reciclado depende fundamentalmente del sistema de trituración que se haya empleado en su proceso de producción. Las trituradoras de impacto, por lo general, son las que permiten alcanzar reducidos tamaños en los áridos produciendo como consecuencia mayor cantidad de finos. A estas trituradoras las siguen las de conos con una producción de finos inferior y las chancadoras.

Es evidente que el tamaño obtenido en la trituración depende fundamentalmente del tamaño que tenía el hormigón de procedencia. Los áridos reciclados presentan formas angulosas debido al proceso de trituración y un aspecto rugoso como consecuencia del mortero adherido a ellos

Para el mismo tamaño máximo de árido, un árido reciclado experimenta pequeñas variaciones de su módulo granulométrico si el sistema de trituración empleado ha sido el mismo que para el árido natural.

Como consecuencia de la disgregación que sufre el árido grueso reciclado durante su transporte y almacenamiento, una vez tamizado se siguen obteniendo porcentajes muy reducidos de arena debido a su mayor friabilidad. Dichos valores oscilan entre el 0.5% y el 2%. Esta fracción fina se caracteriza por presentar un elevado contenido de mortero influyendo negativamente en las propiedades del hormigón.

### **2.1.3.3. Forma y textura superficial**

Las partículas de árido reciclados suelen presentar una textura más rugosa y porosa que la de los áridos naturales debido a la presencia de mortero adherido a la superficie del árido natural. Estas circunstancias hacen que los hormigones que se fabriquen con ellos presentan problemas de trabajabilidad.

Si para determinar la forma del árido grueso se empleó el método del índice de lajas se obtienen valores menores en el árido reciclado. Quizás pueda deberse a que el espesor de las partículas aumente debido a la acumulación de mortero en las caras planas de las partículas con forma de laja.

El coeficiente de forma de las partículas se ve directamente afectado por el sistema de trituración empleado en la obtención del árido reciclado. Las machacadoras proporcionan áridos reciclados con un coeficiente de forma más adecuado que las trituradoras de impactos.

#### **2.1.3.4. Densidad**

La densidad del árido reciclado es menor que la del árido convencional ya que el primero presenta una capa de mortero adherido cuya densidad es inferior a la del árido. La fracción fina obtenida es la que menor densidad tiene debido a la mayor cantidad de mortero adherido que poseen sus partículas por unidad de peso.

Los factores más influyentes sobre la densidad son: el proceso de producción del árido, el tamaño de las fracciones obtenidas y su grado de contaminación.

Si en la fabricación del árido reciclado se empleó una trituradora de impacto, el valor obtenido en la densidad del árido reciclado grueso es ligeramente superior que en los casos en que para su obtención se hayan empleado en machacadoras. Esto es debido a que la trituradora de impactos elimina mejor el mortero adherido en el árido grueso. Sin embargo, en la producción del árido fino son los otros sistemas de trituración los que permiten obtener mejores resultados, obteniéndose valores de la densidad mayores.

#### **2.1.3.5. Absorción**

Los áridos reciclados tienen como propiedad crítica principal su alto nivel de absorción: la demanda de agua y el consumo de cemento del hormigón fresco con árido reciclado son siempre mayores que los de hormigón hecho con grava natural. Esto se debe a la presencia de mortero y otras sustancias adheridas a la superficie de las partículas del árido, que tienden a aumentar la absorción de los áridos al ser menos puros. De hecho, el antiguo mortero que queda pegado a la superficie del árido virgen es la principal causa de muchas de las debilidades del árido reciclado. En áridos naturales, la absorción de agua varía entre un 0% a un 4%, mientras que en un árido reciclado van desde un 3,3% y un 13%, por lo general, la mayor sobrepasa el valor límite de un 2% establecido por la NCh163 Of79.

El tamaño del árido reciclado influye de manera decisiva sobre la absorción. En las fracciones más finas la absorción es mayor, ya que en ellas la cantidad de mortero adherido es superior que en las fracciones más gruesas, siendo más acusado dicho efecto cuanto menor sea la densidad del árido reciclado.

En relación con la porosidad y la absorción del hormigón hecho con una misma dosificación, estas dos propiedades aumentan en el hormigón con árido reciclado, dependiendo de la porosidad y de la absorción del hormigón del cual provienen los áridos reciclados. No obstante, de manera general, se considera que el árido reciclado incluye

material más poroso que un árido normal, debido a su formación y a la presencia de mortero adherido a su superficie.

En cuanto a la calidad de los áridos, de acuerdo con estudios anteriores, se clasifican según su tasa de absorción [13]: mientras más baja sea la tasa de absorción de un árido reciclado, mejor su calidad. Tasas de absorción altas indican un alto nivel en mortero de cemento adherido, lo que generalmente conduce a un hormigón con menor resistencia, durabilidad, y con propiedades de retracción y deformación más altas. Esto se explica mirando la zona de transición interfacial (ITZ), que es la zona de contacto entre la superficie del árido y la pasta de cemento. En efecto, la ITZ difiere entre un árido virgen y un árido reciclado, y representa uno de sus puntos débiles.

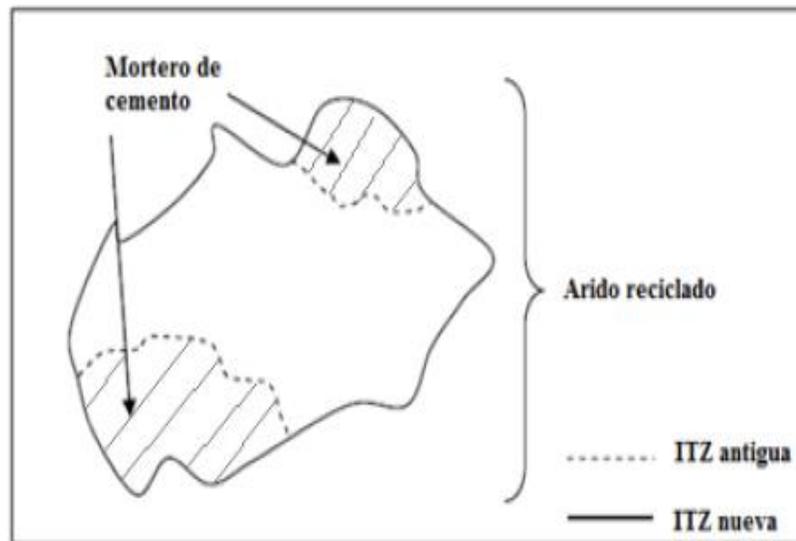


FIGURA 2: Zonas de Transición Interfacial.

#### 2.1.3.6. Resistencia a la fragmentación

El coeficiente del desgaste de los Ángeles en áridos reciclados presenta valores superiores debido en dicho ensayo no solamente se produce la correspondiente pérdida del peso del árido natural sino también la derivada de eliminar la totalidad del mortero adherido.

En fracciones más finas el coeficiente de los Ángeles es mayor debido a que, como ya se ha comentado con anterioridad, el porcentaje de mortero adherido es mayor.

Mediante el empleo de trituraciones sucesivas se logra mejorar la calidad del árido y obtener un coeficiente de los Ángeles con valores más próximos a los del árido natural.

El hormigón del que proceden los áridos reciclados también influye en el valor obtenido en el ensayo observándose que, al aumentar la resistencia, el valor del coeficiente de los Ángeles disminuye.

#### **2.1.3.7. Contenidos de cloruros**

El contenido de cloruros que puede presentar los áridos reciclados puede ser importante cuando provengan de obras en las que hayan estado en contacto con sales fundentes, como, por ejemplo, en pasos de alta montaña, cuando hayan estado en contacto directo con el agua de mar.

Cuando los hormigones origen de los áridos reciclados no estuvieron expuestas a las condiciones del párrafo anterior los valores de los cloruros solubles en agua y los cloruros totales oscilan entre 0.0001% y el 0.005% según la norma NCh 1444 Of 80.

#### **2.1.3.8. Contaminantes e impurezas**

La presencia de impurezas y contaminantes en los áridos reciclados perjudican notablemente las propiedades del hormigón fabricado con ellos. La madera, plástico, yeso, metales, vidrio, ladrillos, asfalto, materia orgánica, etc. Son contaminantes que presentan con mayor frecuencia

Uno de los mayores perjuicios que provocan sobre el hormigón es la caída de su resistencia a compresión. Cuando los elementos contaminantes son restos arcillosos o de cales la disminución en la resistencia es mayor que si el árido reciclado incorpora restos de asfalto o pinturas.

La presencia de un tipo u otro de contaminantes depende de la procedencia del árido reciclado. El árido reciclado procedente de escombros de hormigón presenta un contenido de impurezas bastante inferior al que incorporan los áridos procedentes de escombros de demolición.

#### **2.1.3.9. Resistencia a la compresión**

Finalmente, la resistencia a la compresión no varía de manera significativa si se reemplaza menos de un 30% del árido natural por árido reciclado; si se incorpora una fracción mayor de árido reciclado estos parámetros pueden disminuir hasta en un 20%. De la misma manera, reemplazando hasta un 20% del árido, la retracción y la fluencia no varían significativamente, aunque pueden aumentar hasta un 50% en promedio si el 100% del árido es reciclado [12].

En resumen, todavía existen varias dificultades al controlar la calidad de los áridos procedentes del reciclaje del hormigón, que se explican por las dos siguientes razones: primero, los desechos de hormigón siempre están contaminados con materiales ajenos; segundo, las partículas de árido reciclado siempre tienen una cantidad relevante de mortero adherido. En consecuencia, se imponen requisitos y normas para regular el uso de áridos reciclados y asegurar su buen comportamiento en el nuevo hormigón, y se buscan soluciones para mejorar las propiedades de este tipo de árido, como el tratamiento químico o la saturación previa de los áridos. [14]

## **2.2. Estructura del hormigón.**

El hormigón se define de manera general como una masa de construcción producto de la mezcla de un conglomerante (cemento) con un material pétreo inerte (áridos), mediante la utilización de agua.

El cemento es el componente activo de la mezcla de hormigón; tiene como función principal la de conglomerar los áridos, para formar una pasta homogénea y cohesiva. Proporciona la resistencia mecánica de la pasta de hormigón endurecida.

Por su parte, los áridos se dividen entre el árido grueso (grava, gravilla) y el árido fino (arena). Forman el esqueleto inerte de la estructura y proporcionan rigidez al hormigón; son responsables de la durabilidad y estabilidad del hormigón en el tiempo. El agua confiere plasticidad y trabajabilidad en estado fresco, además de hidratar al aglomerante y ayudar en el curado del hormigón. Finalmente, a estos componentes básicos se pueden añadir aditivos para mejorar algunas propiedades del hormigón.

La estructura de la pasta de hormigón es bastante compleja, sobre todo al observar la zona de transición interfacial, donde la pasta de cemento rodea la partícula de árido. Esta zona puede ser un punto débil en la pasta de hormigón, debido a la complejidad de las reacciones químicas que pueden ocurrir a lo largo de su superficie, tanto necesaria como nociva para la buena homogeneidad del hormigón y para evitar su agrietamiento en el futuro.

### **2.2.1. Áridos.**

Como se dijo previamente, los áridos forman el esqueleto sólido del hormigón, representando aproximadamente tres cuartos del volumen del hormigón total. Permiten darle resistencia al hormigón y reducen la retracción de la pasta de cemento. El objetivo principal es de tener un volumen de huecos mínimo a rellenar con la pasta de cemento, lo que implica una mayor finura y una granulometría adecuada.

Además, las características de los áridos influyen directamente sobre algunas propiedades del hormigón del cual forman parte. Por ejemplo, la durabilidad del hormigón depende en gran parte de la porosidad, de la dureza, del módulo de elasticidad y del coeficiente de dilatación volumétrico del árido. De la misma manera, la resistencia y la adherencia de la mezcla de hormigón está vinculada con la calidad, la limpieza y la textura de la superficie de las partículas de árido. Además, la retracción y la fluencia lenta del hormigón dependen del módulo elástico, de la forma, de la granulometría y del tamaño máximo de aquellas partículas; también influye el contenido de material arcilloso. Finalmente, muchas propiedades intrínsecas del hormigón tienen relación con las características volumétricas, geométricas y mecánicas del árido utilizado. Entre ellas, los factores de mayor influencia sobre la calidad del hormigón son los siguientes: la presencia de impurezas (arcilla, cloruros y sulfatos, etc.), la granulometría, y la densidad del árido.

En consecuencia, la caracterización de los áridos es relevante para la calidad del hormigón y existen restricciones; estos requisitos generales para los áridos se pueden encontrar en las siguientes normas: la NCh163 Of.79.

### **2.2.2. Materiales cementicios.**

El cemento es el componente “noble” del hormigón, siendo el material que permite su existencia. Se presenta como un polvo gris (o blanco en el caso del cemento blanco) que, al dispersarse y reaccionar químicamente con el agua, forma una pasta plástica moldeable que endurece con el tiempo.

Se compone de un material pulverizado producto de la calcinación y clinkerización de una mezcla mineral de calizas (aproximadamente 80%) y arcillas (un 20%). [15]

Al mezclar cemento con una cantidad conveniente de agua, se forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo agua como aire. Es lo que da al hormigón su resistencia y su dureza. Sin embargo, durante una duración determinada, la pasta de hormigón guarda su plasticidad lo que permite moldearla y colocarla donde se requiere. A lo largo de todo este proceso, las reacciones químicas entre el agua y la pasta de cemento proveen el endurecimiento de la pasta de hormigón, generando calor.

Las características relevantes del cemento para controlar su buena calidad son: su finura, que acelera la reacción agua/cemento al aumentar la superficie de contacto, y entonces acelera la toma de resistencia; su temperatura al mezclar con el agua, que acelera la reacción química; el tiempo de fraguado, fenómeno durante lo cual la pasta deja de ser plástica y adquiere rigidez tal que no admite moldearse; su densidad; su calor de hidratación, que tiene bastante importancia en estructuras masivas para el desarrollo de la resistencia mecánica; y por fin su composición química, ya que los productos ajenos generan inestabilidad de volumen y otros efectos nocivos para la pasta de cemento.

### **2.2.3. Micro estructura: zona de contacto cemento/árido.**

La zona de contacto entre las partículas de árido y la pasta cementicia tiene una estructura muy particular, distinta del resto de la pasta, y bastante importante en el desarrollo de la resistencia del hormigón. De hecho, esta zona consiste en pasta de cemento hidratado con mayor porosidad y cristales más grandes, lo que la vuelve menos resistente.

Como ya se ha explicado, el hormigón se puede describir como un sistema de dos fases: una es sólida, compuesta de las partículas de áridos; la otra es la matriz de pasta de cemento. Entonces, los granos de áridos están separados por una capa delgada de pasta de cemento, lo que provoca el fenómeno de exudación interna.

La exudación se define como la segregación del agua por efecto de la decantación de los materiales sólidos. Se explica por el hecho de que el hormigón está constituido por materiales de distinto peso específico. En el caso específico de la zona de interface entre las partículas de áridos y la pasta gel de cemento, la exudación interna se acumula bajo la superficie de los áridos grandes y alargados. Es esos lugares, la zona de transición árido - pasta de cemento tiende a ser débil y propensa a microfisuras. Esto produce una mayor permeabilidad del hormigón con respecto a la pasta de cemento, y entonces una menor resistencia del hormigón total en comparación con la de la pasta de cemento [16].

## **2.3. Propiedades del hormigón.**

### **2.3.1. Durabilidad.**

La durabilidad del hormigón es la capacidad que tiene una vez endurecido de poder permanecer a través del tiempo, sin sufrir alteraciones que puedan ir en desmedro de las condiciones mínimas de seguridad y servicio.

Las causas que podrían afectar esta propiedad pueden tener su origen en el mismo hormigón, por permeabilidad, falta de estabilidad por exceso de expansión o retracción, pérdida de homogeneidad y/o falta de resistencias mecánicas, o bien pueden ser ocasionadas por sobrecargas, impactos, erosión, heladas, ataques químicos, entre otros.

### **2.3.2. Docilidad**

La docilidad es otro punto importante de diseño en un hormigón y tiene la finalidad de indicarnos de forma práctica y fácil de medir, el grado de dificultades que presenta el hormigón para ser manipulado, colocado y compactado dentro de la obra. Eventualmente para entregar al hormigón una mayor docilidad existen aditivos especiales lo que formara parte de

las experiencias de laboratorio que realizaran en este estudio. La docilidad podrá ser determinada mediante el método de asentamiento cono de Abrams.

### **2.3.3. Propiedades mecánicas del hormigón.**

El hormigón debe ser diseñado para cumplir ciertas exigencias que están claramente especificadas, por lo que las proporciones entre los materiales componentes deberán ser estudiadas para que el hormigón resultante se ajuste a lo solicitado. Dentro de los requisitos y características que un hormigón debe cumplir esta la resistencia mecánica, capacidad que tiene el hormigón para soportar las cargas que se apliquen sin agrietarse o romperse.

El hormigón se clasifica en grados, donde la principal característica estructural del hormigón es resistir muy bien los esfuerzos de compresión e inferiormente a la tracción.

#### **2.3.3.1. Resistencia a la compresión.**

La resistencia da un panorama general de la calidad del hormigón, debido a que está directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento, y muchas otras propiedades del hormigón (como su módulo de elasticidad o su impermeabilidad) están también íntimamente relacionadas con la resistencia. Además, los ensayos de resistencia son relativamente fáciles de hacer.

Fundamentalmente, la resistencia depende de dos factores: la estructura física de los productos de la hidratación y las proporciones volumétricas relativas de sus distintos componentes. Más precisamente, para un buen desarrollo de la resistencia de la pasta de cemento, las partículas de cemento deben tener el contacto suficiente con el agua de amasado, además de encontrar una adherencia óptima con los granos de árido.

Entonces, los principales factores que afectan a la resistencia mecánica son la razón agua/material cementíceo y la razón árido/cemento. La razón Agua/Cemento tiene influencia tanto en la porosidad de la pasta de hormigón como en su zona interfacial de transición. A mayor razón A/C, mayor porosidad, lo que vuelve la matriz de la pasta de cemento más débil y entonces el hormigón menos resistente. Al revés, a menor razón A/C, el hormigón presenta una resistencia mayor, siendo directamente relacionada con la calidad y la cantidad de cemento presente. Luego, la relación entre la cantidad de árido y la de cemento también es un factor influyente en la resistencia del hormigón, aunque de menor importancia que la razón A/C. Se estudió que a razón A/C constante, para una mayor razón árido/cemento se nota una resistencia mayor; eso se puede explicar por parte por la absorción de los áridos, quitando agua libre a la mezcla y así bajando efectivamente la razón A/C. [17]

En resumen, la resistencia a la compresión se define como la capacidad del hormigón de resistir la carga por unidad de área especificada a los 28 días de edad. Esta importante propiedad del hormigón está en función de la razón agua/cemento y de la calidad de los áridos que conforman el hormigón, ya que se espera que la resistencia a la compresión se vea modificada a medida que se aumenta el reemplazo de los áridos pétreos por el árido reciclado.

El hormigón se clasifica con respecto a su resistencia especificada a compresión,  $f_c$ , medida en probetas cúbicas de 200 mm de arista, de acuerdo con las normas NCh1017 y NCh1037, a la edad de 28 días, como se indica en la tabla N° 2.1.

Grado	Resistencia especificada, $f_c$	
	MPa	(kgf/cm <sup>2</sup> )
H5	5	( 50)
H10	10	(100)
H15	15	(150)
H20	20	(200)
H25	25	(250)
H30	30	(300)
H35	35	(350)
H40	40	(400)
H45	45	(450)
H50	50	(500)

TABLA 1: Clasificación de los hormigones por resistencia a compresión.  
Fuente: NCh 170.Of 85.

### 2.3.3.2. Resistencia a la flexotracción.

Teóricamente la resistencia a la tracción es aproximadamente un 1/8 a 1/12 de la resistencia a la compresión, esta relación  $f_t/f_c$  depende de la calidad del hormigón y es menor cuando mayor es la  $f_c$ . Esta característica es menos importante que la resistencia a la compresión, debido a que normalmente no se requiere que el hormigón resista fuerzas directas de tracción. Por este motivo se le incorporan otros materiales al hormigón para mejorar este tipo resistencia, en este caso, el árido reciclado se espera que mantenga o mejore esta propiedad en el hormigón.

El hormigón se clasifica con respecto a su resistencia especificada a flexotracción,  $f_t$ , de acuerdo con NCh1017, y ensayadas de acuerdo con la norma NCh1038, a la edad de 28 días, como se indica en la tabla N° 2.2. .

Grados de flexotracción	Resistencia especificada, $f_t$	
	MPa	(kgf/cm <sup>2</sup> )
HF 3	3,0	(30)
HF 3,5	3,5	(35)
HF 4	4,0	(40)
HF 4,5	4,5	(45)
HF 5	5,0	(50)
HF 5,5	5,5	(55)
HF 6	6,0	(60)

TABLA 2: Clasificación de los hormigones por resistencia a flexotracción  
Fuente: NCh 170.Of 85.

### 2.3.4. Ensayo a flexotracción

El ensayo de flexotracción se realiza sobre probetas prismáticas, este se realiza por lo establecido en la NCh 1017. Of 75, siendo las más utilizadas en ensayos de hormigones para pavimentos la de 15x15x60 cm.

Estas probetas se apoyaran sobre rodillos separadores, de este modo se logra contacto rectilíneo, y la carga se ejerce en forma vertical y estarán de modo que las líneas de contacto sean paralelas entre si y perpendiculares a la luz de ensayo por medio de un rodillo centrado o sobre dos situados a un tercio de luz.

Para el caso de carga centrado en el momento flector máximo corresponde a la vertical que pasa por el punto aplicación de la carga y por consiguiente afecta solo al hormigón situado sobre la línea. Para el caso de dos rodillos situados a un tercio de la luz, se tiene la zona central de momento flector constante con lo cual la rotura se producirá en el hormigón más débil de la zona.

- **Equipos necesarios**

Prensa de ensaye.

Dispositivo de tracción por flexión con piezas de apoyo de la probeta y piezas para aplicar la carga.

Regla rectificada de largo mínimo 500 mm.

Regla graduada (huincha) en milímetros y de longitud superior a 400 mm.

- **Procedimiento**

Marcado y medición de las probetas.

Dependiendo de la dimensión básica de la probeta, se aplican uno de los dos procedimientos:

Tipos de la aplicación de la carga.

Dimensión básica	Ensayo	Luz de ensayo
$\geq 150 \text{ mm}$	Cargas P/2 en los límites del tercio central de la luz	$\geq 3$ veces la altura de la probeta
$< 150 \text{ mm}$	Carga P en el centro de la luz de ensayo	$\geq 3$ veces la altura de la probeta

TABLA 3: Aplicación de la carga.  
Fuente: Elaboración propia.

La distancia entre líneas de apoyo y los extremos de la probeta debe ser igual o mayor a 2,5cm. Con líneas rectas, finas e indelebles se marcan sobre las cuatro caras mayores, las secciones de apoyo y de la carga que servirán para colocar y alinear la probeta en la máquina de ensayo.

a) Ensayo

- Se limpian las superficies de contacto de la probeta, máquina de ensayo y se coloca la probeta alineada y centrada dejando la cara de llenado vertical
- Se aplica hasta un 5% de la carga prevista de rotura verificando que los contactos cumplen las tolerancias
- Se continúan la carga en forma continua y sin choques de velocidad uniforme
- Registrar carga máxima (P) expresada en kgf.
- Medir y registrar el ancho promedio (b) y la altura promedio (h) de la probeta en la zona de ruptura, con aproximación de 1 mm.

b) Expresión de resultados

- Si la fractura se las probetas se produce en el tercio central de la luz de ensayo, calcular la resistencia a la tracción por flexión como la tensión de rotura según la fórmula siguiente:

$$R = \frac{P * L}{b * h^2} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

- Si la fractura se produce fuera del tercio central de la luz de la probeta, en la zona comprendida entre la línea de aplicación de carga y una distancia de 0,05 L de esa línea, calcular la resistencia a la tracción por flexión como la tensión de rotura según la fórmula siguiente:

$$R = \frac{3P * a}{b * h^2} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

En que:

R= Tensión de rotura, expresada en megapascales (MPa); (kgf/cm<sup>2</sup>).

P= Carga máxima aplicada, expresada en newton (N); (kgf).

L= Luz de ensayo de la probeta, expresada en milímetros (cm);

b= Ancho promedio de la probeta en la selección de rotura, expresado en milímetros (cm);

h= Altura promedio de la probeta en la sección de rotura, expresado en milímetros (cm);

a= Distancia entre la sección de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo de la línea central de la superficie inferior de la probeta, expresada en milímetros (cm).

- Si la fractura se produce en otro de los sectores indicados anteriormente se desecha el ensayo

### 2.3.5. Ensayo a Compresión mediante el cubo modificado

Esta norma ASTM C 116-90 [21] establece un método de prueba para la determinación de la resistencia a compresión del concreto usando como elemento de prueba un trozo de la probeta viga ensayada a flexión.

Este procedimiento se conoce como “Método del cubo modificado” y fue creado para usarlo en laboratorios como herramienta de estudio, permitiendo determinar valores de resistencia a la compresión en variadas mezclas de hormigón.

Esta norma enuncia la maquinaria que es necesaria para realizar estos ensayos. Describe el procedimiento de prueba y los cálculos que se deben realizar.

Además, entrega ciertas condiciones que deben cumplir los trozos de probetas que se seleccionaran para realizar los ensayos. Esto se refiere a dimensiones y defectos en la superficie de las caras de las probetas.

También indica cómo se deben preparar los elementos de prueba antes de ensayados.

- **Equipos necesarios**

La máquina de ensayo puede ser de cualquier tipo, siempre y cuando la suficiente capacidad para suministrar la tara de carga indicada.

Se ajustara a los requerimientos de la norma MTC E709 “Flexión método de la viga simple cargada en los tercios de la luz”, relativos a la máquina, debe estar equipada con dos bloques de carga de acero con superficies endurecidas, uno de los cuales se apoyara sobre una rotula que estará en contacto con el plato superior de carga y el otro, un bloque rígido y plano que soportara el plato de carga inferior. El diámetro del bloque con apoyo esférico tendrá menos el 75% del ancho de la muestra.

La superficie de apoyo no se debe desviar del plano en más de 0.025 mm por cada 152 mm para un bloque de 152 mm de diámetro, o mayores, ni más de 0.025 mm en el diámetro de cualquier bloque más pequeño.

Sobre las superficies de carga de la muestra se montaran platos de carga maquinados o pulidos con un espesor mayor o igual a 19 mm (3/4”), que cumplan con los requerimientos de aplanamiento de las superficies de carga de las muestras y los requerimientos de dureza para los bloques de carga de las muestras. Los platos de carga deben ser de tales dimensiones que las caras de contactos sean primordialmente cuadradas, y tengan las mismas dimensiones que el ancho nominal de la viga ensayada. El plato de carga superior debe colocarse directamente sobre el plato inferior.

- **Muestreo**

La longitud de la porción rota de las vigas seleccionadas para el ensayo a la compresión debe ser al menos 50 mm más larga que el ancho. Las muestras seleccionadas para el ensayo deben estar libres de grietas, superficies imperfectas u otros defectos obvios.

- **Procedimiento**

La orientación de las muestras debe ser tal que el ancho debe ser igual o menor que la altura. Si la viga tiene una sección transversal cuadrada, las superficies de cara pueden ser los lados de la viga, como originalmente se fundió.

Céntrese los platos de carga en la máquina de ensayo de tal forma que el punto de apoyo del bloque con rotula este alineado con el centro de los platos de carga, aplíquese la carga a los platos por medio de una cabeza ajustable.

Velocidad de carga. Aplíquese la carga en forma continua, sin impactos e interrupciones

Llevar el ensayo hasta que se produzca la falla. Regístrese la carga total señalada por la máquina en el momento de la falla de la muestra ensayada.

- **Ensayo**

Calcúlese la resistencia a la compresión unitaria, con una precisión de 69 kpa (10 psi). Determínese el área de la sección transversal de la muestra, como el promedio de al menos dos medidas de la dimensión del ancho del plato superior como el inferior, determinadas con una precisión de 0.25 mm.

- **Resultados**

El informe de los resultados debe incluir lo siguiente:

- a) El método utilizado en la determinación de la resistencia a la compresión, y su valor.
- b) El número de identificación de la muestra.
- c) Las dimensiones de la altura y el ancho de la muestra en mm (o  $\text{cm}^2$ ).
- d) Áreas de la sección transversal en  $\text{cm}^2$ .
- e) Carga máxima, N (lbf), (kgf).
- f) Edad de las muestras y detalles del curado.
- g) Tipo de falla y aspecto del concreto.
- h) Orientación de las muestras con respecto a la parte superior de la viga fundida.
- i) Condiciones de curado de las muestras y condiciones de humedad durante el ensayo.

## **2.4. Hormigón reforzado con fibra.**

Históricamente las fibras han sido utilizadas para mejorar y reforzar diferentes tipos de materiales de construcción. Estas fibras anteriormente eran de origen vegetal. En tiempos modernos las fibras de vidrio, asbestos, acero y poliméricas han ganado popularidad para remediar y mejorar problemas en el hormigón.

Durante muchos años, la tendencia del hormigón a agrietarse ha sido aceptada como un hecho natural. Hay solamente una razón por la que las grietas ocurren en el hormigón, existen tensiones que exceden la resistencia del hormigón en un momento específico. Los hormigones y morteros de cemento tienen la característica de ser muy resistentes al ser sometidos a fuerzas de compresión, pero no ocurre lo mismo respecto de las fuerzas de tracción. Para aumentar la resistencia a la tracción, son reforzados con barras convencionales de acero, generando un refuerzo continuo de gran efectividad en la construcción de grandes estructuras.

Si el refuerzo de estructuras de hormigón es efectuado también en forma discontinua, mediante fibras cortas, es posible mejorar las propiedades de resistencia a la tracción y, a su vez, disminuir el fisuramiento del hormigón fresco y endurecido.

Las tensiones derivadas de las fuerzas externas pueden ser compensadas proveyendo resistencias estructurales mayores en las estructuras de hormigón, en los pavimentos y en las losas. Sin embargo históricamente ha sido un problema controlar las tensiones intrínsecas, ocasionadas por el encogimiento dentro del propio hormigón, debido a su variedad y ocurrencia impredecibles.

### **2.4.1. Tipos de fibras apropiadas para hormigones**

Las fibras apropiadas empleadas en el refuerzo de matrices de hormigón, son fibras discontinuas, rígidas o flexibles, que presentan una distribución discreta y uniforme dentro de la mezcla que confiere el material homogenizado. La efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión de tensiones por parte de las fibras dependen de muchos factores pero, especialmente, de la naturaleza, tipo y de sus propiedades.

Algunas propiedades características de las fibras apropiadas para hormigones son

- Propiedades geométricas: longitud, sección transversal, relación de aspecto, forma.
- Propiedades físico-químicas: rugosidad de la superficie, densidad, estabilidad química, resistencia al fuego.
- Propiedades mecánicas: rigidez, resistencia, ductilidad, elongación a la rotura

Para el uso efectivo de fibras en el hormigón endurecido se deben tener contempladas las siguientes características:

- Las fibras deben ser significativamente más rígidas que la matriz, es decir, un módulo de elasticidad más alto
- El contenido de fibras por volumen debe ser adecuado.
- Debe haber una buena adherencia entre la fibra y la mezcla de hormigón.
- La longitud de las fibras debe ser suficiente.
- Las fibras deben tener una alta relación de aspecto; es decir, deben ser largas con relación a su diámetro.

Las fibras que comúnmente se están utilizando para reforzar el hormigón, pueden ser clasificadas en dos tipos [19]:

a) Fibras de Módulo de Elasticidad Alto y de grandes esfuerzos, tales como el acero, vidrio, asbesto y carbón, las cuales producen mezclas fuertes, esto es, de gran rigidez y resistencia.

b) Fibras de Módulo de Elasticidad Bajo y de gran alargamiento, tales como el nylon, polipropileno y el polietileno, que tienen una gran capacidad de absorción de energía hasta su rotura y que no conducen a un mejoramiento total de esfuerzos, sino que proporcionan mejores características de resistencia ante cargas abrasivas, explosivas y de impacto.

A continuación se detalla una breve descripción de las características de los tipos de fibras más comúnmente utilizados en el reforzamiento de hormigones en nuestro medio.

#### **2.4.1.1. Fibra de Vidrio**

La fibra de vidrio es un producto de origen mineral, que se elabora a partir de arena de sílice, es un material compuesto consistente en fibras continuas o discontinuas de vidrio embebidas en una matriz plástica.

A partir de la arena de sílice se añaden otros componentes, como cal, alúmina y magnesia así como también determinados óxidos, en proporciones muy estrictas, con el fin de obtener el producto con las características deseadas.

Con estos componentes se realizan una serie de procesos de transformación a partir de los cuales se obtiene la fibra de vidrio, procesos que consisten básicamente en introducir en un horno una mezcla de los componentes, para luego someterla a un proceso de estirado mecánico en hileras obteniéndose filamentos de cortísimo diámetro (5 a 25 micras). Estos hilos son revestidos por unos compuestos orgánicos, generalmente resinas epoxi, que aseguran la unión y protección de dichos hilos.

El vidrio se utiliza como material de refuerzo debido a las siguientes razones [20]:

- Es fácilmente hilable en fibras de alta resistencia.
- Cuando está embebida en una matriz plástica produce un compuesto con muy alta resistencia específica.
- Cuando está unido a varios plásticos se obtienen materiales compuestos químicamente inertes muy útiles en una gran variedad de ambientes corrosivos.

Dentro de las características de las fibras de vidrio, se puede mencionar algunas de sus propiedades mecánicas:

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad promedio	2.7	g/cm <sup>3</sup>
Resistencia ultima a la tracción	3,30x10 <sup>4</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
Alargamiento a la rotura	4,4	%
Módulo de elasticidad	7,46x10 <sup>5</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>

TABLA 4: Propiedades técnicas de las fibras de vidrio.

Fuente: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx>



FIGURA 3: Fibras de vidrio.

Todas las aplicaciones que pueden desarrollarse con este material, deben basarse en un estudio previo minucioso, en el que se consideren a los costos y a los beneficios que éste presenta.

Con bajos porcentajes de fibras de vidrio que se incorporan al hormigón se puede incrementar significativamente la resistencia a la flexión, tracción e impacto, resultando productos de peso ligero y adecuadamente resistente.

El mejoramiento de las propiedades mecánicas del hormigón reforzado con fibras de vidrio, sugiere su uso en aplicaciones donde se requiera resistencias un tanto mejoradas y un

control adecuado de la fisuración. Esto incluye, pavimentos de calles y carreteras pisos industriales, tuberías y reparaciones de estructuras realizadas con hormigón convencional.

#### 2.4.1.2. Fibras de Acero

Las fibras de acero son elementos de corta longitud y pequeña sección que se adicionan al hormigón con el fin de conferirle ciertas propiedades específicas, con las características necesarias para dispersarse aleatoriamente en una mezcla de hormigón en estado fresco, empleando metodologías de mezclado tradicionales.

La efectividad del refuerzo mezcla-fibras, exige a las fibras las siguientes propiedades:

- Una resistencia a tracción significativamente mayor que la del hormigón.
- Una adherencia con la matriz del mismo orden o mayor que la resistencia a tracción de la matriz.
- Un módulo de elasticidad significativamente mayor que el del hormigón.

La fibra de acero generalmente conocida, es fabricada en base al estiramiento y corte de alambre de acero de diámetros típicos que van desde 0.25 a 0.76mm. También existe la fibra de acero plana, producida por un proceso de laminado de alambres de acero, presentada en secciones transversales de 0.15 a 0.41mm de espesor, por 0.25 a 0.90 mm de ancho. Una fibra técnicamente más eficiente es la fibra de acero con extremos ensanchados de 0.15 a 0.30 mm de espesor, por 0.20 a 0.60 mm de ancho, porque proporciona mayor adherencia, homogeneidad y trabajabilidad a la mezcla.

Dentro de las características de las fibras de acero, se puede mencionar sus propiedades técnicas:

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad promedio	7.8	g/cm <sup>3</sup>
Resistencia última a la tracción	2,8x10 <sup>3</sup> - 4,2x10 <sup>3</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
Alargamiento a la rotura	0,5 – 3.5	%
Módulo de elasticidad	2.04x10 <sup>6</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>

TABLA 5: Propiedades técnicas de las fibras de acero  
Fuente: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx>

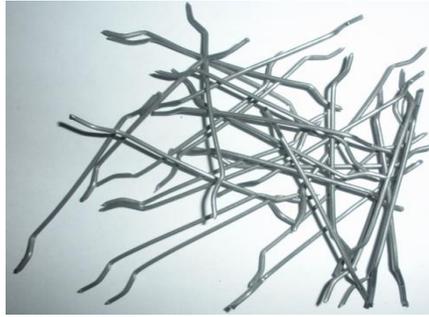


FIGURA 4: Fibra de Acero.

La fibra de acero tiene la desventaja de que su inclusión en el hormigón lanzado puede ocasionar un desgaste fuerte de ciertas partes de la maquinaria y de las mangueras, así como un bloqueo ocasional tipo “nido de pájaro” que puede ser bastante difícil de eliminar.

De los precios comunes en el mercado, las fibras de acero cuestan alrededor de dos a tres veces más que el refuerzo convencional (armaduras) por unidad de peso. Sin embargo no es real el medir el potencial de este nuevo material en base al costo del reforzamiento únicamente, sino tomando en cuenta los costos de hormigón reforzado con fibras de acero versus un hormigón reforzado convencionalmente. Su economía puede ser establecida en base al rendimiento y serviciabilidad de la estructura, ya que las características de ductilidad, resistencia a la fisuración y resistencia dinámica, hacen que este material puede ser utilizado en situaciones donde el hormigón convencional es más voluminoso y menos eficiente.

#### 2.4.1.3. Fibras Acrílicas

Las fibras acrílicas han sido usadas para reemplazar la fibra de asbesto en muchos productos de hormigón reforzado con fibras. También se han agregado fibras acrílicas al concreto convencional a bajos volúmenes para reducir los efectos del agrietamiento por contracción plástica.



FIGURA 5: Fibras Acrílicas.

#### 2.4.1.4. Fibras de Aramida

Las fibras de aramida son dos y media vez más resistentes que las de vidrio y cinco veces más que las de acero, por unidad de masa. Debido al costo relativamente alto de estas fibras, el hormigón reforzado con fibras de aramida se ha usado principalmente como un reemplazo del asbesto en ciertas aplicaciones de alta resistencia.



FIGURA 6: Fibras de Aramida.

#### 2.4.1.5. Fibras de Carbono

Las fibras de carbón son sustancialmente más costosas que los otros tipos de fibras. Por esta razón su uso comercial ha sido limitado. Las fibras de carbón son fabricadas carbonizando materiales orgánicos adecuados en forma fibrosa a altas temperaturas y luego alineando los cristales de grafito resultantes por medio de estiramiento. Tienen alta resistencia a tracción y alto módulo de elasticidad y una característica quebradiza bajo esfuerzo-deformación. Se requiere de investigación adicional para determinar la viabilidad del concreto con fibra de carbón en una base económica. Las propiedades de resistencia al fuego de los compuestos de fibras de carbón necesitan ser evaluadas, pero ignorando el aspecto económico, las aplicaciones estructurales parecen ser prometedoras.

Dentro de las características técnicas de fibras de carbón están dadas en la siguiente tabla:

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad promedio	1.78	g/cm <sup>3</sup>
Resistencia última a la tracción	4,91x10 <sup>4</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
Alargamiento a la rotura	1.9	%
Módulo de elasticidad	2.59x10 <sup>6</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>

TABLA 6: Propiedades técnicas de las fibras de carbón

Fuente: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx>



FIGURA 7: Fibra de Carbono.

#### **2.4.1.6. Fibras de Nylon**

Es el nombre genérico que identifica una familia de polímeros. Las propiedades de las fibras de nylon son impartidas por el tipo a base de polímeros, la adición de diferentes niveles de aditivos, las condiciones de fabricación y las dimensiones de las fibras. Actualmente sólo dos tipos de fibras de nylon se comercializan para el concreto. El nylon es estable en el calor, hidrófilo, relativamente inerte y resistente a una gran variedad de materiales. Es particularmente efectivo para impartir resistencia al impacto y tenacidad a flexión y para sostener e incrementar la capacidad para soportar cargas del hormigón después de la primera grieta.

#### **2.4.1.7. Fibras de Poliéster**

Las fibras de poliéster están disponibles en forma de monofilamentos y pertenecen al grupo de poliéster termoplástico. Son sensibles a la temperatura y a temperaturas por encima del servicio normal sus propiedades pueden ser alteradas. Las fibras de poliéster son algo hidrófobas. Se han usado a bajos contenidos (0.1% por volumen) para controlar el agrietamiento por contracción plástica en el hormigón.

#### **2.4.1.8. Fibras macro-sintéticas**

Se identifican químicamente como poliolefinas (polipropileno y/o polietileno). El polipropileno es un polímero del propileno  $[\text{CH}_3\text{-CH}=\text{CH}_2]_n$ . El polietileno es un polímero de la resina del etileno  $[\text{H-C-H}=\text{H-C-H}]_n$ . En el futuro de las fibras macro-sintéticas es muy prometedor ya que mejora las propiedades del hormigón, su durabilidad, resistencia al fuego y su tenacidad con una mayor ductilidad y con unos costos razonables.

### 2.4.1.9. Polipropileno

Las fibras de polipropileno primero fueron usadas para hormigón reforzado en los años sesentas. El polipropileno es un polímero de hidrocarburo sintético cuya fibra está hecha usando procesos de extrusión por medio de estiramiento en caliente del material a través de un troquel.

Las fibras de polipropileno son hidrófobas y por lo tanto tienen como desventajas el tener pobres características de adherencia con la matriz del cemento, un bajo punto de fusión, alta combustibilidad y un módulo de elasticidad relativamente bajo. Las largas fibras de polipropileno pueden resultar difíciles de mezclar debido a su flexibilidad y a la tendencia a enrollarse alrededor de las orillas extremas de las hojas de la mezcladora.

Las fibras de polipropileno son tenaces, pero tienen baja resistencia a tracción y bajo módulo de elasticidad; tienen una característica plástica de esfuerzo-deformación. Se asegura que se han usado exitosamente contenidos de fibras de polipropileno de hasta 12% por volumen, con técnicas de fabricación de empaquetado manual, pero se ha reportado que volúmenes de 0.1% de fibras de 50 mm en el concreto han causado una pérdida de revenimiento de 75 mm. Según reportes, las fibras de polipropileno reducen la contracción no restringida, plástica y por secado del hormigón a contenidos de fibra de 0.1 a 0.3 % por volumen.

Una detallada información sobre las propiedades más importantes de polipropileno se muestra a continuación:

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad promedio	0.98	g/cm <sup>3</sup>
Resistencia última a la tracción	3.10x10 <sup>2</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>
Alargamiento a la rotura	20	%
Módulo de elasticidad	9.97x10 <sup>3</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>

TABLA 7: Propiedades técnicas de las fibras de polipropileno

Fuente: <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx>



FIGURA 8: Fibra de Polipropileno (Forta-Ferro).

#### **2.4.1.10. Poliolefina impregnada con resina.**

Este tipo de fibra se fabrica a partir del polipropileno y/o polietileno de materiales reciclados, que finalmente, se impregna con una capa de resina. La fibra tiene un perfil corrugado que favorece su trabazón con el hormigón.

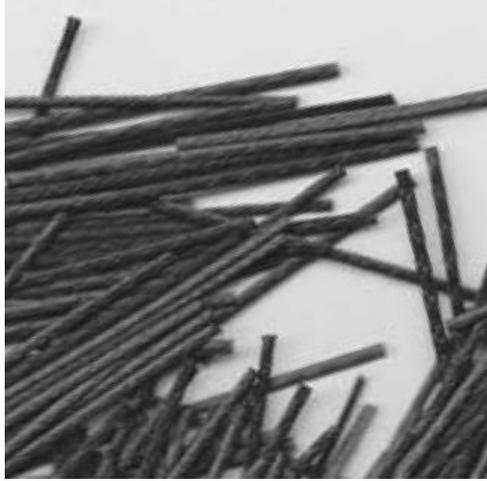


FIGURA 9: Fibra de Poliolefina (Barchip R50).

## *Capítulo III*

### *Desarrollo de la investigación*

## **CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **3.1. Estudio experimental.**

#### **3.1.1. Generalidades.**

El diseño de la experiencia es descrito en el presente capítulo, guiando la secuencia de etapas de la investigación que conduzcan a determinar los objetivos de la investigación.

Esta experiencia busca determinar en qué medida varían las propiedades en el hormigón al aumentar el porcentaje de fibras sintéticas, a probetas de hormigón con áridos reciclado, con remplazo parcial al árido natural.

En primer lugar se confeccionarán hormigón patrón de 0, 25, 50 y 100% de árido reciclado, los cuales no contienen fibra. Luego a este mismo diseño se le agregaran distintos porcentajes de fibras. Las dosis de fibra que se aplicaran serán de 3, 6 y 9 kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Con cada hormigón se fabricara 3 vigas para ensayos a flexotracción y a compresión mediante el método del cubo modificado, todas a 28 días.

Los áridos a utilizar provienen de la demolición de postes de alumbrado, este material debe ser tratado para su utilización, ya que debe ser limpiado y triturado para su posterior incorporación al hormigón. Este material fue recolectado con anticipación en la región de Valparaíso y su utilización será de tamaño máximo nominal de 20 mm sustituyendo a la grava.

A continuación se detallará de acuerdo a la metodología implementada, los criterios adoptados para la correcta ejecución de los ensayos, con la aplicación de las normas correspondientes, los procedimientos y equipamientos a utilizar para determinar las variables.

#### **3.1.2. Planteamiento y definición de variables.**

##### **3.1.2.1. Variables independientes.**

Las variables independientes de esta investigación tienen relación con los factores que se modificarán para obtener las variables de respuesta; como lo es la cantidad, el tamaño de del árido reciclado y las incorporaciones de fibras sintéticas, que se añadirán al hormigón.

- a) Cantidad de árido reciclado: La cantidad de áridos reciclados a sustituir será de 0%, 25%, 50%, y 100% en relación al peso del agregado grueso respectivamente, debido a que es un ensayo tentativo para ver cómo se comporta en la mezcla.
- b) Tamaño del árido reciclado: Se utilizarán solo un tamaño de árido reciclado, al igual que los áridos convencionales.
  - Árido grueso: Tamaño máximo de 19 mm.
- c) Cantidad de fibras sintéticas: La cantidad de fibras agregadas al hormigón será de 3 kg/m<sup>3</sup>, 6 kg/m<sup>3</sup>, y 9 kg/m<sup>3</sup> en relación al peso del hormigón

### **3.1.2.2. Variables dependientes**

Las variables dependientes corresponderán a los resultados de las resistencias mecánicas, obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión y tracción por flexión.

- a) Resistencia a la compresión: Esfuerzo máximo que pueden soportar los trozos de las vigas a través del método del cubo modificado que es igual a una carga de aplastamiento.
- b) Resistencia a la tracción por flexión: Corresponde a la resistencia obtenida mediante el ensayo de tracción por flexión de rotura de probetas prismáticas de hormigón simplemente apoyadas.
- c) Docilidad: se determina mediante la medida del asentamiento del asentamiento cono de Abrams.

### **3.1.3. Factorial de experimento.**

Con las variables independientes se confeccionó la factorial de experimento, en esta investigación se confeccionaron dieciséis tipos de hormigones diferentes estos se identifican de acuerdo al porcentaje de los áridos reciclados y a la cantidad de fibra utilizada. En la siguiente tabla se identifican los distintos tipos de hormigones confeccionados, cabe mencionar que los que no contienen fibras coinciden con los hormigones patrones.

Árido Reciclado, %	Dosis de fibras, Kg/m <sup>3</sup>			
	0	3	6	9
0	0/0	0/3	0/6	0/9
25	25/0	25/3	25/6	25/9
50	50/0	50/3	50/6	50/9
100	100/0	100/3	100/6	100/9

TABLA 8: Combinación de niveles para cada factor  
Fuente: Elaboración propia.

En total se fabricarán 16 tipos de hormigones para el desarrollo de la experiencia.

### 3.1.4. Materiales que intervienen en el estudio

Los materiales a utilizar para los hormigones son, fibra sintética estructural, cemento Portland pulzonalico grado corriente, agua potable, grava convencional, arena convencional y grava reciclada.

#### 3.1.4.1. Fibra sintética estructural.

El nombre comercial de la fibra poliolefínica utilizada en esta investigación se denomina “fibra Barchip R50” proporcionada por la empresa EPC CHILE S.A las especificaciones de esta fibras se indican en la siguiente tabla

Características	Propiedad del material
Resina	Poliolefina
Largo	48 mm
Resistencia a la compresión	640 Mpa
Textura superficial	Relieve continuo
Diámetro	0.5 mm
Densidad especificada	0.90 - 0.92 (g/cm <sup>3</sup> )
Punto de fusión	150 – 170 grados Celsius
Punto de ignición	>450 grados Celsius

TABLA 9: Especificaciones de Fibra Barchip R50  
Fuente: EPC CHILE S.A



FIGURA 10: Fibra de Poliolefina (Barchip R50).  
Fuente: Elaboración propia

#### 3.1.4.2. Cemento.

El cemento a utilizar en esta investigación, es el cemento portland pulzolánico marca La Unión. Este producto está formulado sobre la combinación de Clinker, puzolana y yeso. Por su composición el producto clasifica como cemento Portland Puzolanico grado corriente de acuerdo a la norma NCh 148 of 68.



FIGURA 11: Cemento la Unión.  
Fuente: Elaboración propia.

### **3.1.4.3. Agua.**

El agua a utilizar para esta investigación será agua potable, de acuerdo a la norma NCh 1498. Of82 puede emplearse como agua de amasado siempre que no se contamine antes de su empleo. Ya que el agua es un componente fundamental al momento de fabricar hormigón, debido a que su presencia condiciona tanto el desarrollo de las propiedades en su estado fresco como en la etapa de endurecimiento.

El agua cumple dos roles en su calidad de material componente del hormigón:

- a) Participa en el proceso de hidratación del cemento, el cual no puede desarrollarse sin su presencia.
- b) Otorga trabajabilidad necesaria al hormigón, siendo determinante para definir su asentamiento.

Son por estas razones que el agua de amasado y curado debe ser limpia, sin presencia de materiales que puedan dañar dichos procesos.

### **3.1.4.4. Áridos.**

Los áridos a utilizar en esta experiencia serán arena y grava que corresponden a áridos fluviales que fueron extraídos del río Aconcagua. Los áridos reciclados serían recolectados por demoliciones de postes de alumbrado público.

## **3.2. Desarrollo estudio experimental.**

### **3.2.1. Generalidades.**

En este punto se describe los trabajos experimentales llevados a cabo para el estudio en cuestión, los cuales fueron realizados en el laboratorio de la Universidad Valparaíso de Chile, con el fin de comparar la normativa técnica existente, para garantizar un estudio serio que arroje fielmente el comportamiento del árido reciclado como material componente y replazante del árido en la fabricación de un hormigón de buena calidad, con la incorporación de fibras poliolefinicas.

### **3.2.2. Estudio material.**

#### **3.2.2.1. Trituración del material.**

La trituración se realizó en forma manual.

#### **3.2.2.2. Selección fracción gruesa.**

Para asegurarse de obtener una selección satisfactoria y lo más homogénea posible, se determinó pasando el material por las mallas  $\frac{3}{4}$ ",  $\frac{1}{2}$ ",  $\frac{3}{8}$ ",  $\frac{1}{4}$ ", N°4 y N°8, tamaño suficiente para realizar ensayos previos requeridos por la norma chilena para el uso de áridos en la fabricación de hormigón.

Aquí; se observó que el material resultante del proceso de trituración contenía partículas rodadas del árido virgen natural utilizado en la fabricación del hormigón antiguo, partículas del hormigón chancado y partículas rodadas chancadas con hormigón adherido, lo cual y considerando que existía un bajo contenido de lajas, no acusaría problemas de trabajabilidad en el hormigón.

Luego se acopio el material en sacos, para así evitar que el escombro recibiera polvo en el periodo que estaría en el laboratorio hasta ser utilizado

#### **3.2.2.3. Propiedades del árido a controlar.**

EL estudio se realizó según la NCh 163 of .79 de tal forma de asegurarse que los áridos naturales y los árido reciclados cumpliera con la mayor cantidad de requisitos impuestos por la norma chilena.

Se realizaron los ensayos obligatorios, destinados a control de diseños de dosificación y algunos optativos; estos últimos a modo de comparación para ver cómo se comportaría el material frente a ciertas características de los áridos

#### **3.2.2.4. Extracción y preparación de muestras.**

Debido que la selección del material era homogénea en todos los sacos acopiados, se seleccionó uno al azar para que fuera utilizado en todos los ensayos que se realizaron posteriormente para el árido reciclado.

### 3.2.2.5. Tamizado y determinación de granulometría.

Para determinar la granulometría de los áridos se utilizó la NCh165.Of77, y en general el procedimiento consiste en acondicionar una muestra de ensayo y determinar su masa, luego hacer pasar la muestra por una serie de tamices establecidos y determinar la masa de las fracciones retenidas en cada tamiz y finalmente determinar los porcentajes parciales retenidos y expresar la granulometría en función de dichos porcentajes. Finalmente los resultados obtenidos se cotejan con los requisitos de la norma.

En este ensayo se utilizó el material que se encontraba en el saco mencionado anteriormente para los áridos reciclados y el árido natural fue retirado del acopio en los laboratorios, cual se homogenizo, mediante cuarteo para obtener una muestra representativa del árido reciclado a estudiar.

Luego el material extraído se secó hasta masa contante en horno.



FIGURA 12: Horno utilizado para Secado de muestras.  
Fuente: Elaboración propia



FIGURA 13: Acopio de grava reciclada.  
Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestran los resultados obtenidos de la granulometría tanto de la gravas como de la arena.

- Granulometría arena.

ASTM – mm	Pasa M1 %	Pasa M2 %	Pasa M3 %	Promedio Muestras % que pasa	Muestra promedio corregida	Requisito NCh 163 % que pasa
3/8" – 10	100	100	100	100		
N°4 – 5	81	82	83	82	100	95 – 100
N°8 – 2.5	64	63	64	64	78	80 – 100
N°16 – 1.25	52	51	53	52	63	50 – 85
N°30 – 0.630	43	46	46	45	55	25 – 60
N°50 – 0.315	32	35	38	35	43	10 – 30
N°100 – 0.16	9	8	7	8	10	2 – 10

TABLA 10: Granulometría de la Arena  
Fuente: elaboración propia

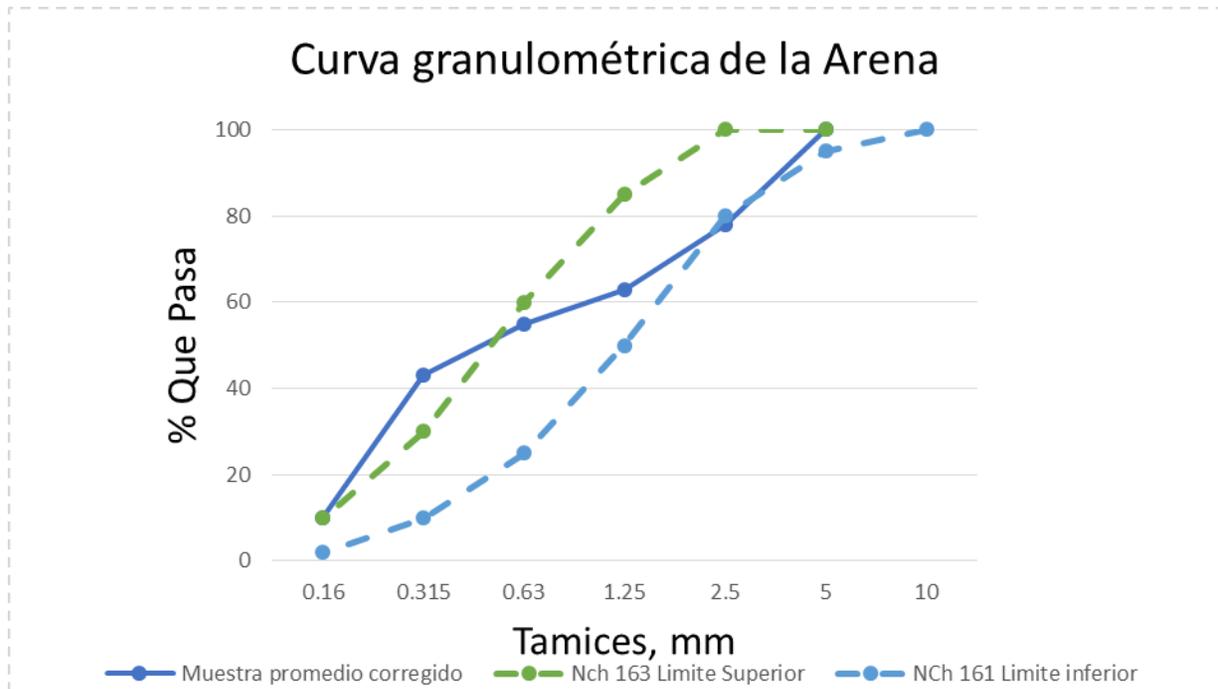


GRÁFICO 1: Curva granulométrica de la Arena.  
Fuente: Elaboración Propia.

- Granulometría grava natural 20mm

Tamices ASTM – mm	Pasa M1 %	Pasa M2 %	Pasa M3 %	Promedio muestras % Que Pasa	Requisito NCh 163 % que pasa
3/4" – 20	100	100	100	100	90 – 100
1/2" – 12.5	50	51	54	52	–
3/8" – 10	24	26	21	24	20 – 55
Nº4 – 5	1	1	3	2	0 – 10
Nº8 – 2.5	0	0	0	0	0 – 5

TABLA 11: Granulometría de la grava natural 20 mm  
Fuente: elaboración propia

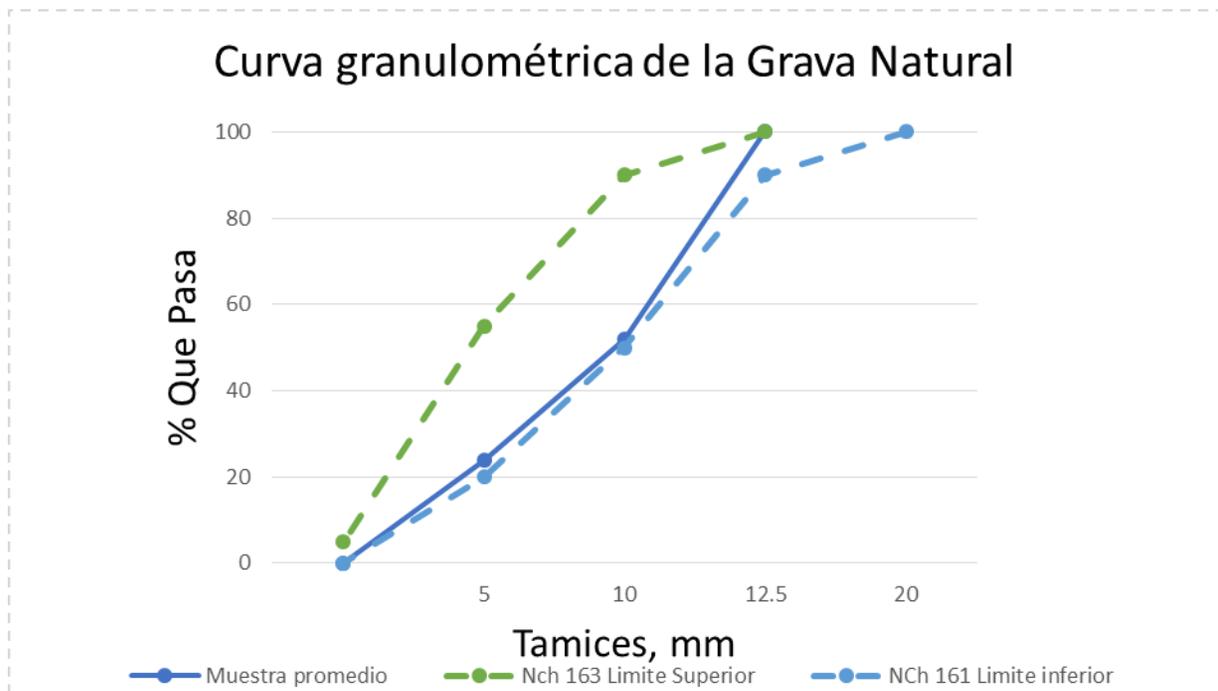


GRÁFICO 2: Curva granulométrica de la grava natural 20mm.  
Fuente: elaboración propia

- Granulometría grava reciclada

Tamices ASTM – mm	Pasa M1 %	Pasa M2 %	Pasa M3 %	Promedio muestras % Que Pasa	Requisito NCh 163 % que pasa
3/4" – 20	100	100	100	100	90 – 100
1/2" – 12.5	50	54	49	51	–
3/8" – 10	22	22	26	23	20 – 55
Nº4 – 5	10	10	10	10	0 – 10
Nº8 – 2.5	1	1	1	0	0 – 5

TABLA 12: Granulometría de la grava reciclada 20 mm  
Fuente: elaboración propia

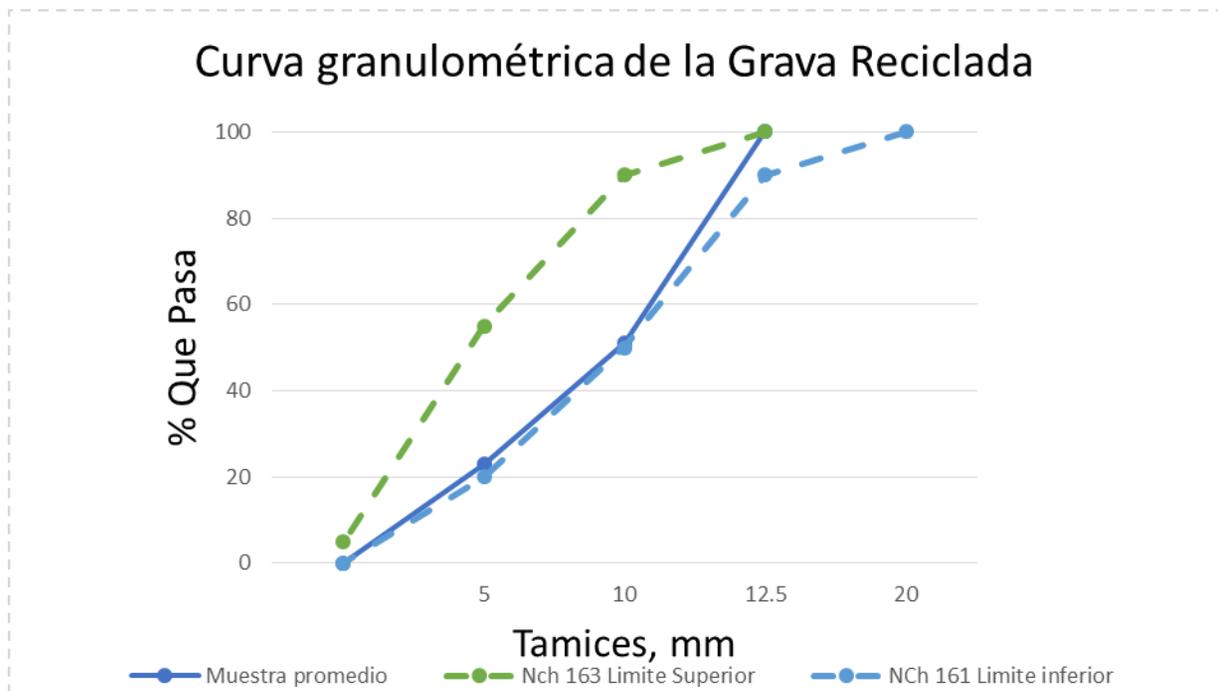


GRÁFICO 3: Curva Granulometría de la grava reciclada 20mm.  
Fuente: Elaboración Propia.

- Resumen granulométricas

Tamices ASTM	Tamices Abertura Mm	Grava Reciclada % Pasa	Grava Natural % Pasa	Arena % Pasa
¾	20	100	100	
½	12.5	51	52	
3/8	10	23	24	100
N°4	5	10	2	82
N°8	2.5	1	0	64
N°16	1.25			52
N°30	0.630			45
N°50	0.315			35
N°100	0.16			8

TABLA 13: Resumen de Granulometrías de Áridos  
Fuente: elaboración propia



FIGURA 14: Tamices utilizados para análisis granulométría.  
Fuente: Elaboración propia.

Luego, la granulometría del árido total de cada mezcla de hormigón será indicada en la tabla N°13, considerando 50% árido grueso y 50% de árido fino para cada una, por el alto contenido de grueso en la arena:

**50% GN + 50% A**

ASTM	Mm	Granulometría
3/4"	19	100
1/2"	12.5	76
3/8	10	62
N° 4	5	42
N° 8	2.5	32
N° 16	1.25	26
N° 30	0.63	23
N° 50	0.315	18
N° 100	0.16	4

**12,5% GR+ 37,5% GN + 50% A**

ASTM	Mm	Granulometría
3/4"	19	100
1/2"	12.5	76
3/8	10	62
N° 4	5	43
N° 8	2.5	32
N° 16	1.25	26
N° 30	0.63	23
N° 50	0.315	18
N° 100	0.16	4

**25% GR+ 25% GN + 50% A**

ASTM	mm	Granulometría
3/4"	19	100
1/2"	12.5	76
3/8	10	61
N° 4	5	45
N° 8	2.5	32
N° 16	1.25	26
N° 30	0.63	23
N° 50	0.315	18
N° 100	0.16	4

**50% GR+ 50 % A**

ASTM	Mm	Granulometría
<b>3/4"</b>	19	100
<b>1/2"</b>	12.5	75
<b>3/8</b>	10	61
<b>N° 4</b>	5	46
<b>N° 8</b>	2.5	33
<b>N° 16</b>	1.25	26
<b>N° 30</b>	0.63	23
<b>N° 50</b>	0.315	18
<b>N° 100</b>	0.16	4

TABLA 14: Granulometría con distintos porcentajes de áridos reciclados  
Fuente: elaboración propia

**3.2.2.6. Determinación del material fino menor a 0.080 mm**

El contenido máximo de finos tanto para las gravas como para las arenas están estipulados en la NCh 163. Of79.

Estos límites indican lo siguiente:

	Grava	Arena
a).- para hormigón sometido a desgaste % máximo	0.5	3.0
b).- para todo otro hormigón % máximo	1.0	5.0

Para determinar el contenido de material fino menos a 0.080 mm se utilizó la NCh 1223. Of77. En general este ensaye consiste en acondicionar una muestra de ensayo y determinación de masa inicial. Separar el material fino inferior a 0.080 mm mediante lavado y tamizado. La pérdida de material respecto a la masa inicial se expresa como porcentaje de material fino inferior a 0.080 mm.

A continuación se muestra los resultados obtenidos tanto para la arena como para la gravas.

- Arena

<b>Masa estado seco (g)</b>	563
<b>Masa lavada seca (g)</b>	556
<b>% material fino</b>	1.24

TABLA 15: Resultado ensayo material fino menor a 0.080 mm arena.  
Fuente: elaboración propia

Finalmente podemos decir que el material fino menor a 0.080 mm Obtenido cumple con la norma.

- Grava natural

<b>Masa estado seco (g)</b>	5135
<b>Masa lavada seca (g)</b>	5098
<b>% material fino</b>	0.72%

TABLA 16: Resultado ensayo material fino menor a 0.080 mm Grava.  
Fuente: elaboración propia

Finalmente podemos decir que el material fino menor a 0.080 mm Obtenido cumple con la norma

- Grava reciclada

<b>Masa estado seco (g)</b>	5270
<b>Masa lavada seca (g)</b>	5233
<b>% material fino</b>	0.70%

TABLA 17: Resultado ensayo material fino menor a 0.080 mm Grava reciclada.  
Fuente: elaboración propia

Finalmente podemos decir que el material fino menor a 0.080 mm Obtenido cumple con la norma, ya que los áridos reciclados fueron lavados después de su trituración.

### **3.2.2.7. Determinación de las densidades real, neta y la absorción de agua.**

De acuerdo a la NCh 163. Of 79 existen ensayos obligatorios destinados a control para el uso, en este caso para dosificaciones, entre los cuales están los que determinan la densidad aparente y real, y la absorción de agua, tanto de las gravas como arenas.

#### **3.2.2.7.1. Determinación de las densidades reales, netas y absorción de agua de las arenas.**

Para determinar las densidades reales, netas y absorción de agua de las arenas se utilizó la NCh 1239. Of79. En resumen este ensayo consiste en acondicionar la muestra de arena, luego se obtiene su masa en condiciones seca y saturada superficialmente seca, a continuación se obtiene el volumen como la masa de agua desplazada por el árido sumergido en un matraz

aforado y finalmente se determinan las densidades real y neta y la absorción de agua en función de los valores obtenidos en las diferentes condiciones de determinación de masas.

En la tabla siguiente se muestran los valores obtenidos en el ensayo realizado.

<b>m<sub>ss</sub> (g)</b>	<b>107</b>
<b>M<sub>m</sub> (g)</b>	<b>725.3</b>
<b>m<sub>s</sub> (g)</b>	<b>105</b>
<b>M<sub>a</sub> (g)</b>	<b>658.8</b>
<b>Densidad real del árido saturado superficialmente seco (kg/m<sup>3</sup>).</b>	<b>2642</b>
<b>Densidad real del árido seco (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2593</b>
<b>Densidad neta (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2727</b>
<b>Absorción ( % )</b>	<b>1.90%</b>

TABLA 18: Resultados ensayo densidades reales, netas, y absorción de agua de la arena.  
Fuente: elaboración propia

### 3.2.2.7.2. Determinación de las densidades reales, netas y absorción de agua de las gravas.

Para determinar las densidades reales, netas y absorción de agua de las Gravas se utilizó la Nch 1117. Of79. En general este ensayo consiste primero en preparar la muestra, luego se determina su masa por pesada al aire ambiente en condiciones seca y saturada superficialmente seca, enseguida se determina su volumen por diferencia entre pesadas al aire ambiente y sumergida en agua. Finalmente se determinan las densidades real y neta y la absorción de agua en función de los valores obtenidos en las diferentes condiciones de pesada.

En las tablas siguientes se muestran los valores obtenidos en los ensayos realizados.

- **Grava Natural**

<b>Pesada sumergida (g)</b>	<b>2013</b>
<b>Pesada al aire ambiente del árido saturado superficialmente seco (g)</b>	<b>3214</b>
<b>Pesada al aire ambiente del árido Seco (g)</b>	<b>3178</b>
<b>Densidad real del árido saturado superficialmente seco (kg/m<sup>3</sup>).</b>	<b>2676</b>
<b>Densidad real del árido seco (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2646</b>
<b>Densidad neta (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2728</b>
<b>Absorción ( % )</b>	<b>1.1%</b>

TABLA 19: Resultados ensayo densidades reales, netas y absorción de la grava natural.  
Fuente: Elaboración Propia.

- **Grava Reciclada**

<b>Pesada sumergida (g)</b>	<b>1914</b>
<b>Pesada al aire ambiente del árido saturado superficialmente seco (g)</b>	<b>3216</b>
<b>Pesada al aire ambiente del árido seco (g)</b>	<b>3079</b>
<b>Densidad real del árido saturado superficialmente seco (kg/m<sup>3</sup>).</b>	<b>2470</b>
<b>Densidad real del árido seco (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2365</b>
<b>Densidad neta (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2643</b>
<b>Absorción (%)</b>	<b>4.4%</b>

TABLA 20: Resultados ensayo densidades reales, netas y absorción de la grava reciclada.  
Fuente: Elaboración Propia.

La condición más distorsionada que presenta este análisis es la condición de porosidad, pues está relacionada con la absorción de agua, característica que se muestra como la más desfavorable del árido reciclado en este caso la grava. Este parámetro presta grandes alteraciones, obteniéndose los valores que se muestra en la tabla N°20. Se presenta un problema claro en este aspecto, pues la norma limita la absorción muy debajo del resultado obtenido (2.0 %).

### **3.2.2.8. Determinación de la resistencia al desgaste de gravas recicladas**

Este ensayo determinara el grado de resistencia a la abrasión que presenta la partícula, mediante la NCh 1369. Of.79.

Una alta porosidad del escombro hace dudar del buen comportamiento del material frente al desgaste. Por esta razón se efectuó un ensayo de desgaste para el árido, mediante la máquina de Desgaste de los Ángeles.

Los resultados obtenidos muestran un grado bastante bueno al límite, en comparación con los exigidos por la norma que es un 40%.

Este resultado asegura de cierta forma que el material no tendrá problemas para ser utilizado como hormigón en lo que a resistencia a la abrasión y durabilidad se refiere.

A continuación se muestran los resultados obtenidos:

Granulometría			Grado 3	Grado 4	Grado 5	Grado 6	Grado 7
Tamices	% Retenido	% que pasa	40 -20	40-10	20 - 10.0	10 - 5.0	5 - 2.5
3/4"		100					
1/2"	49.4	50.6		49.4	49.4		
3/8"	27.7	22.9		27.7	27.7		
1/4"	15.5	7.4				15.5	
N°4	5.9	1.5				5.9	
N°8	1.2	0.3					1.2
Sumatoria				<b>77.1</b>	77.1	21.4	1.2
Masa inicial, mi (g)				5000+-10			
Esferas Números			12	12	11	8	6
Masa (g)			5000+-25	5000+-25	4584+-25	3330+-25	2500+-15
N° de revoluciones			1000	500	500	500	500

#### % PARTICULAS RETENIDAS

Masa Inicial	5000 (g)	Masa Final	3692(g)
Desgaste de los Ángeles	26.16%		

TABLA 21: Resultado del ensayo del desgaste de los ángeles de las gravas recicladas.

Fuente: Elaboración propia



FIGURA 15: Instrumento utilizado en el desgaste de los ángeles.

Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Dosificación de hormigones

Una vez realizado todos los ensayos exigidos por la NCh 163. Of79, para conocer las características de los áridos y determinar si son aptos para utilizarlos, se debe escoger el método que utilizaremos para dosificar, en esta investigación se utilizó la metodología IDIEM.

Finalmente se deben especificar los valores que definen las características del hormigón como la resistencia especificada según Nch170. Of85, el nivel de confianza, la docilidad, el tamaño máximo nominal y la desviación estándar.

#### 3.3.1. Dosificación hormigón H20

Antes de realizar la dosificación debemos especificar los valores siguientes

- Resistencia especificada  $f_c$  200 kg/cm<sup>2</sup>
- Tamaño máximo del árido 20 mm
- Desviación estándar  $S$  35 Kgf/cm<sup>2</sup> (estimada)
- Nivel de confianza 90 %
- Asentamiento entre 8 +- 2 cm.

#### 3.3.2. Determinación de la Resistencia Media Requerida

Para determinar resistencia media requerida se utilizó la siguiente expresión:

$$f_r = f_c + S \times t \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Dónde:

$f_r$ : Resistencia media requerida, kgf/cm<sup>2</sup>

$f_c$ : Resistencia especificada, kgf/cm<sup>2</sup>

$t$ : Factor según nivel de confianza

$s$ : Desviación estándar, kgf/cm<sup>2</sup>

Primero que todo se determina el valor “ $t$ ” en función de nivel de confianza. Para esta dosificación utilizamos un nivel de confianza del 90% con este dato obtenemos el valor de “ $t$ ” de la siguiente tabla.

Nivel de Confianza, %	$t$
95	1,645
90	1,282
85	1,036
80	0,842

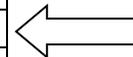


TABLA 22: Factor estadístico  $t$ .  
Fuente: IDIEM

Finalmente se determina la resistencia media requerida.

$$f_r = f_c + s \times t = 200 + 35 \times 1,282 = 245 \text{ kg/cm}^2$$

### 3.3.3. Determinación Dosis de Cemento

La determinación del cemento está en función de la resistencia requerida de 245 kg/cm<sup>2</sup>, Cuando el valor de la resistencia media requerida no coincide con los valores de la tabla se debe interpolar.

Dosis de cemento estimada en función de la resistencia media requerida		
Resistencia media requerida Kg/cm <sup>2</sup>	Dosis estimada kg/cm <sup>2</sup>	
	Cemento corriente	Cemento de alta resistencia
200	310	260
220	325	275
240	345	290
260	355	305
280	370	315
300	385	330
320	395	340
340	405	355
360	415	365
380	425	375
400	430	385

TABLA 23: Determinación dosis de cemento.

Fuente: IDIEM

$$C = 348 \text{ kg/m}^3$$

### 3.3.4. Determinación de la cantidad de Agua de amasado.

La determinación del agua está en función en la Tabla N°23. En esta investigación se utilizó la determinación de la cantidad de cemento. Cuando el valor de la resistencia media requerida no coincida con los valores de la tabla se debe interpolar.

<b>Dosis de agua estimada en función de la cantidad de cemento</b>	
<b>dosis de cemento kg/m<sup>3</sup></b>	<b>agua de amasado lt/m<sup>3</sup></b>
260	167
290	172
310	176
340	180
370	184
400	188
430	192
460	194

TABLA 24: Determinación de la cantidad de agua.

Fuente: IDIEM

$$W = 181 \text{ lt/m}^3$$

### 3.3.5. Determinación del peso del hormigón

La estimación del peso de m<sup>3</sup> de hormigón, se determina mediante el peso aproximado del m<sup>3</sup> de hormigón fresco compactado, encontramos para hormigón armado general, vibrado, con árido de tamaño máximo 20 mm.

$$P = 2440 \text{ kg/m}^3$$

### 3.3.6. Determinación del peso total de áridos.

La determinación del peso total de áridos. Se obtiene restando del peso de 1 m<sup>3</sup> de hormigón, los pesos de cemento y agua

Para determinar el peso total de áridos se utilizó la siguiente expresión:

$$T = P - (C + W) = 2440 - (348 + 181) = 1911 \text{ kg/m}^3$$

Para el cálculo del peso de cada árido. Tenemos un 50% para áridos gruesos y 50% para áridos finos por ende nos queda:

- Árido grueso: 955.5 kg/m<sup>3</sup>
- Árido fino: 955.5 kg/m<sup>3</sup>

### 3.3.7. Dosificación por m<sup>3</sup> hormigón

Material	Peso
Dosis de agua [L]	181
Cemento [kg]	348
Peso arena [kg]	955.5
peso grava [kg]	955.5

TABLA 25: Dosificación por m<sup>3</sup> hormigón.  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.3.8. Dosificación Final

- **Dosificación de hormigón con 0% de Grava reciclada.**

DOSIFICACION	PATRON Peso[kg/m <sup>3</sup> ]	Peso por 45 L seco[kg]
Cemento	348	15.660
Grava natural	956	43,020
Grava reciclada	0	0
Arena	956	43,020
Agua	181	8,145

TABLA 26: Dosificación de hormigón con 0% de Grava reciclada.  
Fuente: Elaboración Propia

- **Dosificación de hormigón con 25% de Grava reciclada**

DOSIFICACION	PATRON Peso[kg/m <sup>3</sup> ]	peso por 45 L seco [kg]
Cemento	348	15,660
Grava natural	717	32,265
Grava reciclada	239	10,755
Arena	956	43,020
Agua	181	8,145

TABLA 27: Dosificación de hormigón con 25% de árido reciclado.

Fuente: Elaboración Propia

- **Dosificación de hormigón con 50% de Grava reciclada**

DOSIFICACION	PATRON Peso[kg/m <sup>3</sup> ]	peso por 45 L seco [kg]
Cemento	348	15,660
Grava natural	478	21,510
Grava reciclada	478	21,510
Arena	956	43,020
Agua	181	8,145

TABLA 28: Dosificación de hormigón con 50% de árido reciclado

Fuente: Elaboración Propia

- **Dosificación de hormigón con 100% de Grava reciclada**

DOSIFICACION	PATRON Peso[kg/m <sup>3</sup> ]	peso por 45 L seco [kg]
Cemento	348	15,660
Grava natural	0	0
Grava reciclada	956	43,020
Arena	956	43,020
Agua	181	8,145

TABLA 29: Dosificación de hormigón con 100% de árido reciclado.

Fuente: Elaboración Propia

### 3.4. Elaboración de Hormigones.

Para la confección de todas las mezclas se utilizó los procedimientos indicados en la NCH1018.EOf77. El volumen de las amasadas utilizado fue mayor que el 20% del volumen necesario para efectuar los ensayos del hormigón fresco y/o confeccionar probetas, tal y como lo indica la NCh1018.EOf77.

#### 3.4.1. Programación de las amasadas.

En total se realizaron dieciséis amasadas, las cuales se realizaron en 6 series distintas, las cuales se realizaron en diferentes días debido a la disponibilidad de moldes. En la primera y la segunda serie se realizaron tres amasadas, de 45 litros cada una, con los cuales se confeccionaron todos los hormigones patrones, en la tercera serie se realizaron los hormigones con los 0% de los áridos reciclados, la cuarta serie se confeccionaron hormigones con el 25% de áridos reciclados la quinta serie se confeccionaron hormigones con el 50% de áridos reciclados y finalmente en la sexta se confeccionaron hormigones con el 100% de áridos reciclados.

Serie	Nº de Amasadas	Cantidad (L)	Hormigón
1	1	45	0/0
1	2	45	25/0
2	3	45	50/0
2	4	45	100/0
3	5	45	0/3
3	6	45	0/6
3	7	45	0/9
4	8	45	25/3
4	9	45	25/6
4	10	45	25/9
5	11	45	50/3
5	12	45	50/6
5	13	45	50/9
6	14	45	100/3
6	15	45	100/6
6	16	45	100/9

TABLA 30: Programación de amasadas.  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.2. Mezclado

Los hormigones se elaborarán en el laboratorio de hormigones de la Universidad de Valparaíso. En esta investigación se utilizó el mezclado mecánico puesto que la norma NCh 170. Of85 establece que sólo se puede utilizar el mezclado manual para hormigones grado H5.

Para fabricarlos se utilizó una botonera eléctrica de eje basculante, de capacidad máxima de 50L de hormigón, que rota a una velocidad aproximada de 20 rev/min.



FIGURA 16: Betonera eléctrica.  
Fuente: Elaboración Propia.

A continuación se detalla el procedimiento para el mezclado:

- Pesar cada uno de los materiales, todos mediante por peso individual de cada material.
- Humedecer el tambor del mezclador para que no absorba el agua de amasado.
- Luego, se agrega la gravilla, la arena y el cemento a la betonera, utilizando un ángulo de 60° respecto del eje vertical. Mezclado de 30 segundos aproximadamente.
- Se agrega alrededor del 75% del agua y se mezcla por otros 30 segundos. Según la consistencia que se observe en el hormigón, se agrega o no el resto del agua, hasta llegar a una trabajabilidad adecuada.
- Finalmente se agrega la fibra esparciéndola cuidadosamente para evitar que se formen bolas de fibra.

### **3.4.3. Docilidad del hormigón**

La docilidad de la pasta de hormigón se determina mediante la medida del asentamiento de cono de Abrams. Este ensayo consiste en medir la diferencia de altura entre el cono de metal y el de hormigón luego de  $d$ ; así se puede apreciar la trabajabilidad y la consistencia de dicho hormigón.

El ensayo se realiza según la norma NCh1019 Of.74 “Construcción - Hormigón – Determinación de la docilidad – Método de asentamiento del cono de Abrams”.

A continuación se indica el procedimiento seguido:

#### **✓ Muestras del hormigón**

La cantidad de hormigón necesaria para efectuar el ensayo se obtendrá de acuerdo a NCh171.

#### **✓ Acondicionamiento del molde**

Colocar el molde sobre la plancha de apoyo horizontal, ambos limpios y humedecidos sólo con agua.

#### **✓ Llenado del molde.**

Pararse sobre las pisaderas evitando el movimiento del molde durante el llenado. Inmediatamente se llenara el molde en tres capas de aproximadamente igual volumen, cada capa fue apisonada con 25 golpes de varilla-pisón distribuidos uniformemente en toda la sección, finalmente se enrasó la superficie haciendo rotar sobre ella la varilla-pisón.

#### **✓ Levantamiento del molde**

Levantar el molde suavemente en dirección vertical sin perturbar el hormigón. Efectuar esta operación en un lapso de 5 seg a 10 seg.

✓ **Tiempo de operación.**

Las operaciones de llenado y levante del molde tendrán una duración inferior o igual a 3 min.

✓ **Medición del asentamiento.**

Una vez levantado el molde, medir inmediatamente la disminución de altura del hormigón moldeado respecto al molde, con aproximación de 0,5 cm. Hacer esta medición en el eje central del molde en su posición primitiva.



FIGURA 17: Cono de Abrams.  
Fuente: Elaboración Propia.

#### **3.4.4. Confección y curado de probetas en laboratorio**

En esta experiencia se confeccionaran probetas destinadas a ensayos de flexotracción, de estas mismas se harán los ensayos a compresión, mediante el método del cubo modificado.

##### **✓ Llenado de moldes y compactación de probetas**

Los moldes tiene que estar totalmente limpios, esas son llenados por medio de una Coruña o pala, con una altura de caída tal que no se segregue el hormigón, una vez llena la probeta se procede a la compactación de las muestras, consistió en utilizar un vibrador interno de frecuencia mínima de 6000 pulsaciones/minutos, ya vibradas se espera ver que pierda la mayor cantidad de aire.



**FIGURA 18: Probetas prismáticas**  
Fuente elaboración propia

##### **✓ Acabado e identificación**

Finalizada la compactación, la superficie de cada probeta es enrasada y alisada, a continuación claramente marcada para evitar que se confundan.

### ✓ Desmolde de vigas

Las probetas fueron desmoldadas después de 24 horas de su confección, con el mayor cuidado posible para no afectar al hormigón.

### ✓ Proceso de curado

Luego del desmolde de las probetas, dicho que se efectuó en una cámara de curado en la cual deben permanecer en dicha piscina hasta sean ensayadas a los 28 días. Al situar las probetas en este lugar se evita que las probetas sufran cargas o impactos que puedan dañar el hormigón.



FIGURA 19: Cámara de curado.  
Fuente: Elaboración propia

### 3.4.5. Ensayos

#### 3.4.5.1. Ensayo de tracción por flexión (NCh 1038 of 77)

**Equipos:** se utiliza una prensa que tendrá la rigidez suficiente para resistir los esfuerzos del ensayo sin alterar las condiciones de distribución y ubicación de la carga y lectura de los resultados.

Descripción:

- La sensibilidad de la prensa será tal que la menor división de la escala de lectura sea menor o igual a 1% de la carga máxima.
- La exactitud de la prensa tendrá una tolerancia de +/- 1% de la carga dentro del intervalo utilizable de las escalas de lectura.
- Sus elementos de contacto con la probeta tendrán la superficie cilíndrica (de este modo se logra un contacto rectilíneo).
- Dispositivo que regula la velocidad de aplicación de la carga.
- Aplicaran la carga y sus reacciones en forma vertical, y estarán dispuestas de modo que las líneas de contacto sean paralelas entre si y perpendiculares a la luz de ensayo.
- Contaran con accesorios que permitan fijar y mantener la luz de ensayo.
  - Tendrán una longitud igual o mayor al ancho, “b” de las probetas.

**Medición de las probetas:** las probetas fueron retiradas de la piscina de curado, luego antes del ensayo se registran sus dimensiones y peso.

**Ensayo:**

Se limpió las superficies de contacto de la placa de carga y las caras de ensayo de las probetas.

Luego se colocó la probeta alineada y centrada en la máquina de ensayo, procurando que la luz de ensayo sea la correcta; la cara de llenado se coloca de tal forma que mire hacia el lado contrario del motor de la prensa.

Por último se aplicó la carga en forma uniforme, y se registró la carga máxima

“P”, expresada en kilo.



FIGURA 20: Ensayo a flexotracción  
Fuente: Elaboración Propia



FIGURA 21: Momento de rotura del Ensayo a flexotracción  
Fuente: Elaboración Propia

### 3.4.5.2. Ensayo a compresión

A continuación se detalla cómo se llevó a cabo esta etapa, rigiéndose según lo estipulado en la norma ASTM C 116-90, “Método del cubo modificado”.

**Equipo:** se utiliza una prensa que tendrá la rigidez suficiente para resistir los esfuerzos del ensayo sin alterar las condiciones de distribución y ubicación de la carga y lectura de los resultados.

Descripción:

- Tendrá un sistema de rotula que permita hacer coincidir la resultante de la carga aplicada con el eje de la probeta.
- Las superficies de aplicación de la carga serán lisas y planas, no se aceptaran desviaciones con respecto al plano superior a 0,015 mm en 100 mm medidos en cualquier dirección.
- La sensibilidad de la prensa será tal que la menor división de la escala de lectura sea inferior o igual al 1% de la carga máxima.
- La exactitud de la prensa tendrá una tolerancia de +/- 1% de la carga dentro del rango utilizable de la escalas de lecturas.
- Dispositivo que regula la velocidad de aplicación de la carga.
- La velocidad de aplicación de la carga es de 3,5 kg/seg/cm<sup>2</sup>.

### Ensayo

Se limpió las superficies de contacto de la placa de carga y las caras de ensayo de las probetas.

Se centra los platos de carga en la máquina de ensayo de tal forma que el punto de apoyo del bloque con rotula este alineada con el centro de la carga, aplicándose la carga a los platos por medio de una cabeza ajustable

Luego se colocó la probeta alineada y centrada en los platos en la máquina de ensayo con la cara de llenado frente al operador. Por último se aplicó la carga en forma uniforme, y se registró la carga máxima “P”, expresada en kilogramos.



FIGURA 22: Ensayo a compresión mediante el cubo modificado.  
Fuente: Elaboración Propia



FIGURA 23: Prensa de ensayos  
Fuente: Elaboración Propia

## *Capítulo IV*

# *Presentación y análisis de resultados*

## CAPÍTULO IV, PRESENTACION Y ANALISIS DE RESULTADOS.

### 4.1. Ensayos de asentamiento.

Se presentan los resultados de ensayos de asentamiento del cono de Abrams para los cuatro hormigones fabricados, en función del contenido de árido reciclado y las distintas dosis de fibras; las barras correspondientes se muestran en la tabla 31:

✓ Resultados generales ensayo asentamiento, cm.

Árido Reciclado, %	Contenido de Fibras, %.			
	0	3	6	9
0	6,5	5,0	4,5	4,0
25	5,0	5,5	4,0	3,0
50	4,5	5,0	4,0	3,0
100	4,0	5,0	3,5	2,5

TABLA 31: Resultados generales ensayo asentamiento.  
Fuente: Elaboración Propia.

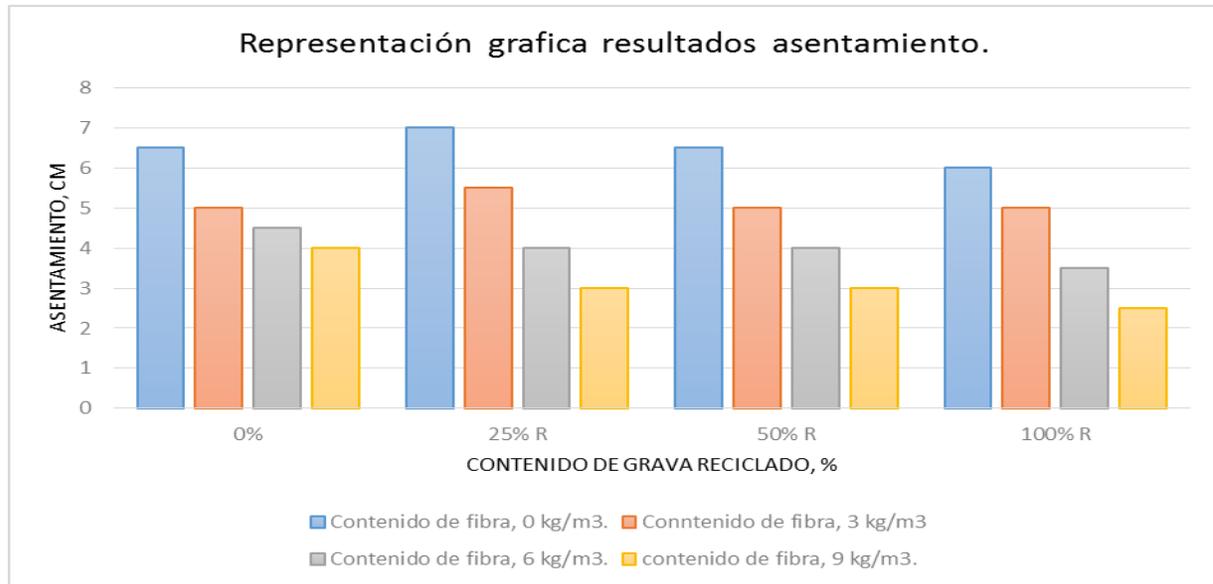


GRÁFICO 4: Representación gráfica resultados asentamiento  
Fuente: elaboración propia

En se puede observar que, a medida que aumenta la dosis de fibras, se verifica una disminución progresiva de asentamiento debido a la mayor trabazón que impone. El efecto prácticamente similar en todos los hormigones. Sin embargo, a pesar de lo ocurrido, los hormigones mantienen su plasticidad, permitiendo su colocación y compactación en los moldes sin dificultad, o sea, manteniendo una docilidad satisfactoria.

## 4.2. Densidad Aparente.

Se graficaron los valores de densidad que se obtuvieron para cada serie de hormigón en función del porcentaje de árido reciclado y de las dosis de fibras que se utilizó, lo cual se presenta en la tabla 32:

✓ Resultados generales densidades aparente promedio.

Árido Reciclado, %	Densidad, kg/m <sup>3</sup> .			
	0	3	6	9
0	2416.97	2389.50	2368.48	2354.74
25	2395.15	2391.92	2387.88	2384.65
50	2364.44	2357.98	2350.70	32348.28
100	2359.60	2352.32	32337.77	22333.73

TABLA 32: Resultados generales Densidades a Parente Promedio.  
Fuente: Elaboración Propia.

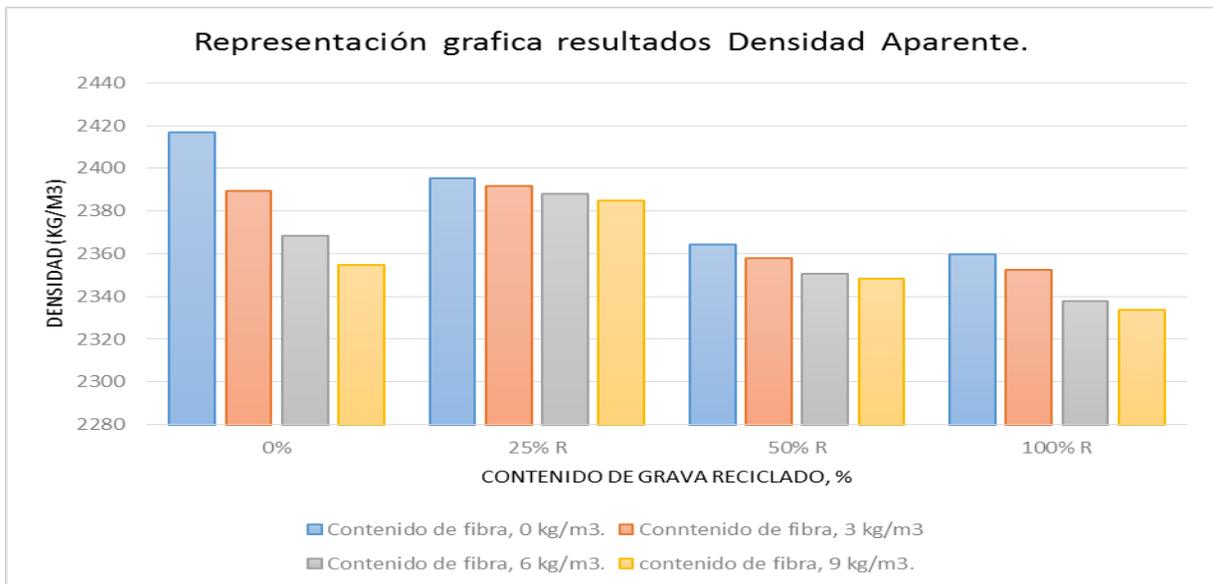


GRÁFICO 5: Variación de densidad aparente, con 0% árido grueso reciclado.  
Fuente: Elaboración Propia.

Primero se puede observar en el gráfico que mientras más árido reciclado del hormigón más baja la densidad de hormigón endurecido, mientras las diferentes barras parecen tener la misma pendiente descendente al aumentar las fibras de poliolefinas y el porcentaje de los áridos gruesos reciclados. Esta tendencia se explica por la densidad de la fibra que inferior a la del hormigón, como también los granos de los áridos reciclados, lo que repercute directamente en la densidad del hormigón que conforman.

### 4.3. Ensayo a Flexotracción.

Este ensayo se realizó siguiendo todo lo establecido en la norma NCh 1038, el cual fue explicado en el capítulo anterior. Todas las probetas ensayadas se fracturaron en el tercio central de la viga, los ensayos se realizaron a los 28 días.

#### 4.3.1. Resultados.

✓ Hormigón 0% de árido grueso reciclado.

Hormigón	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia Relativa, %
0/0	30.23	100
0/3	33.03	109
0/6	33.42	111
0/9	30.40	101

TABLA 33: Resistencia a la flexotracción a los 28 días, con 0% de árido grueso.  
Fuente: Elaboración propia.

Los datos de la tabla 33 se presentan en un gráfico que relaciona la resistencia a flexotracción resultante con cada dosis de fibras trabajadas, en el cual podemos ver el aumento de resistencia según las dosis de fibras para las series de hormigón con 0% de árido reciclado.

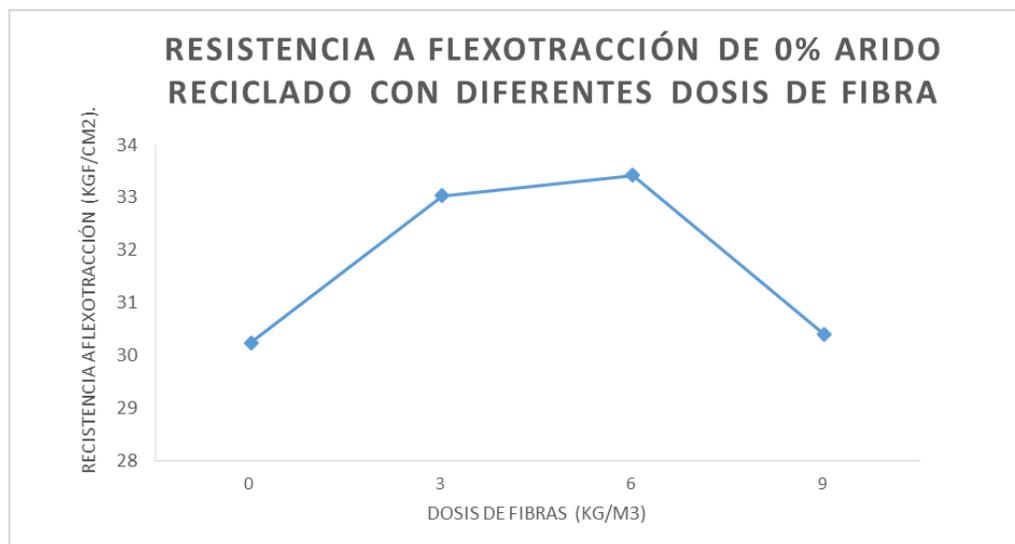


GRÁFICO 6: Variación de resistencia a flexotracción, con 0% árido grueso reciclado.  
Fuente: Elaboración Propia.

En el gráfico 6 muestra un aumento (2.8 kg/cm<sup>2</sup>) entre 0 a 3 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras, esta tendencia se mantiene llegando a su máxima resistencia en 6 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (33.42 kg/cm<sup>2</sup>) y una reducción hacia los 9 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (30.2 kg/cm<sup>2</sup>).

✓ Hormigón 25% de árido grueso reciclado.

Hormigón	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia Relativa, %
25/0	29.11	100
25/3	32.06	110
25/6	32.22	111
25/9	29.54	101

TABLA 34: Resistencia a la flexotracción a los 28 días, con 25% de árido grueso.  
Fuente: Elaboración propia.

Los datos de la tabla 34 se presentan en un gráfico que relaciona la resistencia a flexotracción resultante con cada dosis de fibras trabajadas, en el cual podemos ver el aumento de resistencia según las dosis de fibras para las series de hormigón con 25% de árido grueso reciclado.

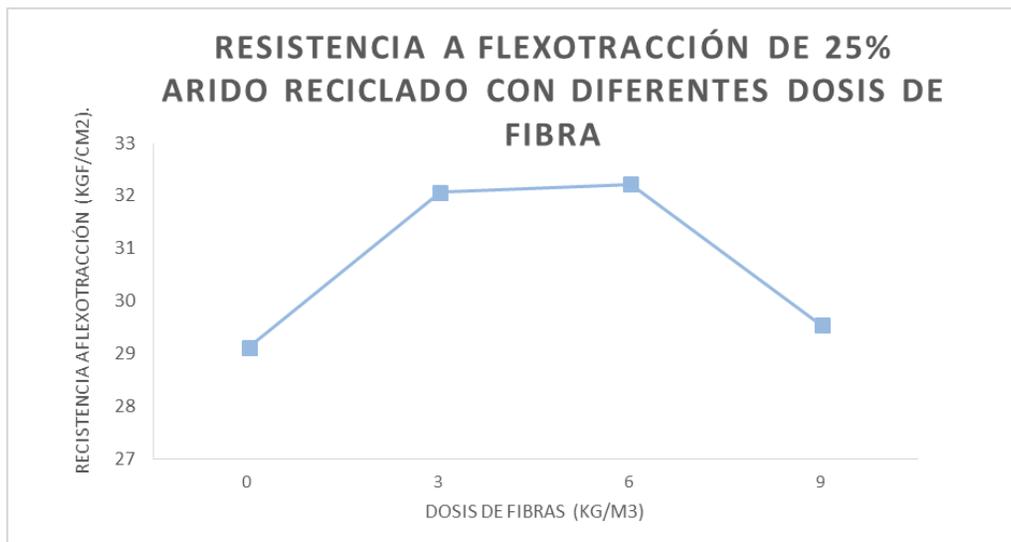


GRAFICO 7: Variación de resistencia a flexotracción, con 25% árido grueso reciclado.  
Fuente: Elaboración Propia.

En el gráfico 7 muestra un aumento (2.95 kg/cm<sup>2</sup>) entre 0 a 3 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras, esta tendencia se mantiene su máxima resistencia en 6 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (32.22 kg/cm<sup>2</sup>) y una reducción hacia los 9 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (2.68 kg/cm<sup>2</sup>).

✓ Hormigón 50% de árido grueso reciclado.

Hormigón	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia Relativa, %
50/0	28.24	100
50/3	30.03	106
50/6	31.00	110
50/9	28.39	101

TABLA 35: Resistencia a la flexotracción a los 28 días, con 50% de árido grueso.  
Fuente: Elaboración propia.

Los datos de la tabla 35 se presentan en un gráfico que relaciona la resistencia a flexotracción resultante con cada dosis de fibras trabajadas, en el cual podemos ver el aumento de resistencia según las dosis de fibras para las series de hormigón con 50% de árido grueso reciclado.

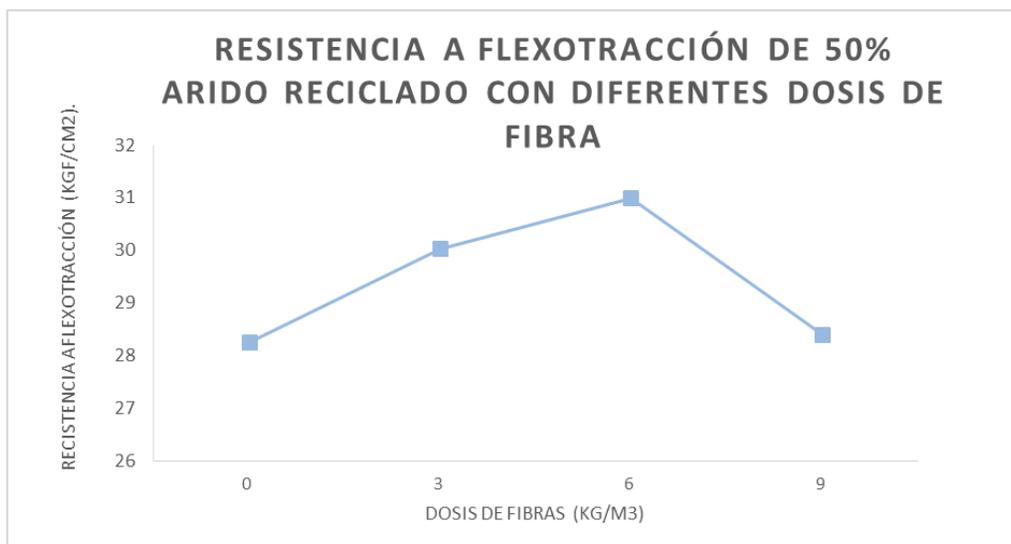


GRÁFICO 8: Variación de resistencia a flexotracción, con 50% árido grueso reciclado.  
Fuente: Elaboración Propia.

En el gráfico 8 muestra un aumento (1.59 kg/cm<sup>2</sup>) entre 0 a 3 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras, esta tendencia se mantiene llegando a su máxima resistencia en 6 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (31 kg/cm<sup>2</sup>) y una reducción hacia los 9% de dosis de fibras (2.71 kg/cm<sup>2</sup>).

✓ Hormigón 100% de árido grueso reciclado.

Hormigón	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia Relativa, %
100/0	26.12	100
100/3	28.38	109
100/6	29.12	112
100/9	26.09	99

TABLA 36: Resistencia a la flexotracción a los 28 días, con 100% de árido grueso.  
Fuente: Elaboración propia.

Los datos de la tabla 36 se presentan en un gráfico que relaciona la resistencia a flexotracción resultante con cada dosis de fibras trabajadas, en el cual podemos ver el aumento de resistencia según las dosis de fibras para las series de hormigón con 100% de árido grueso reciclado.

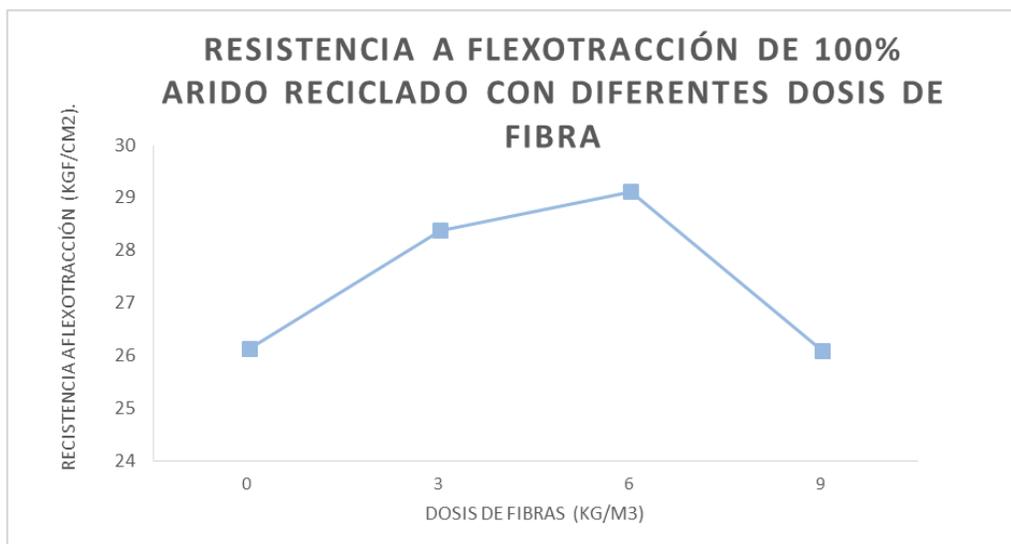


GRÁFICO 9: Variación de resistencia a flexotracción, con 100% árido grueso reciclado.  
Fuente: Elaboración Propia.

En el gráfico 9 muestra un aumento (2.26 kg/cm<sup>2</sup>) entre 0 a 3 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras, esta tendencia se mantiene llegando a su máxima resistencia en 6 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (29.12 kg/cm<sup>2</sup>) y una reducción hacia los 9 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (3.03 kg/cm<sup>2</sup>).

✓ Resultado generales resistencia a flexotracción,  $\text{kgf/cm}^2$  - %.

Árido Reciclado, %	Contenido de Fibras, $\text{kg/m}^3$			
	0	3	6	9
0	30,2 – 100	33,0 – 100	33,4 – 100	30,4 – 100
25	29,1 – 96	32,1 – 97	32,2 – 97	29,5 – 97
50	28,2 – 93	30,0 – 91	31,0 – 93	28,3 – 93
100	26,1 – 86	28,4 – 86	29,1 – 86	26,1 – 86

TABLA 37: Resultados generales Resistencia a la flexotracción a los 28 días.  
Fuente: Elaboración propia.

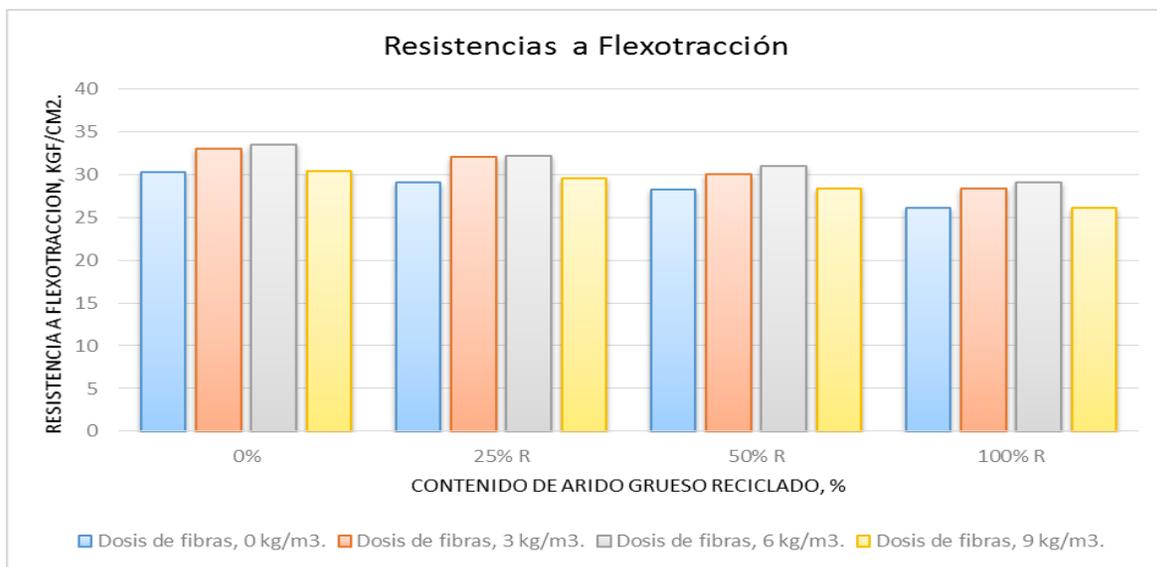


GRÁFICO 10: Resumen de la resistencia a la flexotracción.  
Fuente: Elaboración Propia.

Puede observarse claramente el efecto del contenido de grava reciclada sobre la resistencia a flexotracción, a medida que este aumenta, se verifica una reducción de resistencia que es proporcional al contenido de material reciclado. Se puede establecer los siguientes promedios:

- ✓ Para 0% de grava reciclada 100%
- ✓ Para 25% de grava reciclada 96,5%
- ✓ Para 50% de grava reciclada 92,5%
- ✓ Para 100% de grava reciclada 86,3%

El efecto del contenido de fibras poliolefínicas sobre la resistencia a flexotracción, según puede observarse en las tablas 33 a 36, presenta un comportamiento similar: a medida que se incrementa la dosis de fibra, se verifica un aumento en la resistencia a flexotracción hasta llegar a un máximo, con la dosis de  $6 \text{ kg/m}^3$ , para decaer bruscamente con la dosis de  $9 \text{ kg/m}^3$ , en de donde se desprende que hay un contenido óptimo de fibra, igual a  $6 \text{ kg/m}^3$ .

#### 4.4. Ensayo a Compresión.

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión, mediante del ensayo del cubo modificado a 28 días respectivamente. En las siguientes tablas representan los promedios obtenidos de estos ensayos.

##### 4.4.1. Resultados.

✓ Hormigón 0% de árido grueso reciclado

Hormigón	Resistencia Kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia Relativa, %
0/0	183.19	100
0/3	194.67	106
0/6	204.71	112
0/9	187.59	102

TABLA 38: Resistencia a la compresión a los 28 días, con 0% de árido grueso.  
Fuente: Elaboración Propia.

Los datos de la tabla 38 se presentan en un gráfico que relaciona la resistencia a compresión resultante con cada dosis de fibras trabajadas, en el cual podemos ver el aumento de resistencia según las dosis de fibras para las series de hormigón con 0% de árido reciclado.

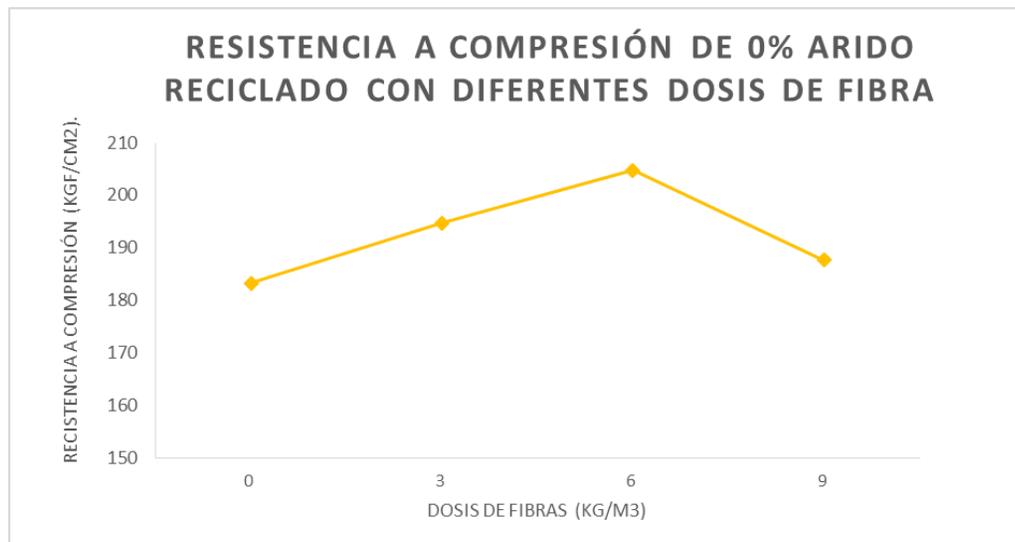


GRÁFICO 11: Variación de resistencia a compresión, con 0% árido grueso reciclado.  
Fuente: Elaboración Propia.

En el gráfico 11 muestra un aumento (11.48 kg/cm<sup>2</sup>) entre 0 a 3 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras, esta tendencia se mantiene llegando a su máxima resistencia en 6 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (204.71 kg/cm<sup>2</sup>) y una reducción hacia los 9 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (17.12 kg/cm<sup>2</sup>).

✓ Hormigón 25% de árido grueso reciclado

Hormigón	Resistencia Kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia Relativa, %
25/0	181.38	100
25/3	189.76	105
25/6	202.28	112
25/9	183.74	101

TABLA 39: Resistencia a la compresión a los 28 días, con 25% de árido grueso.

Fuente: Elaboración Propia.

Los datos de la tabla 39 se presentan en un gráfico que relaciona la resistencia a compresión resultante con cada dosis de fibras trabajadas, en el cual podemos ver el aumento de resistencia según las dosis de fibras para las series de hormigón con 25% de árido grueso reciclado.

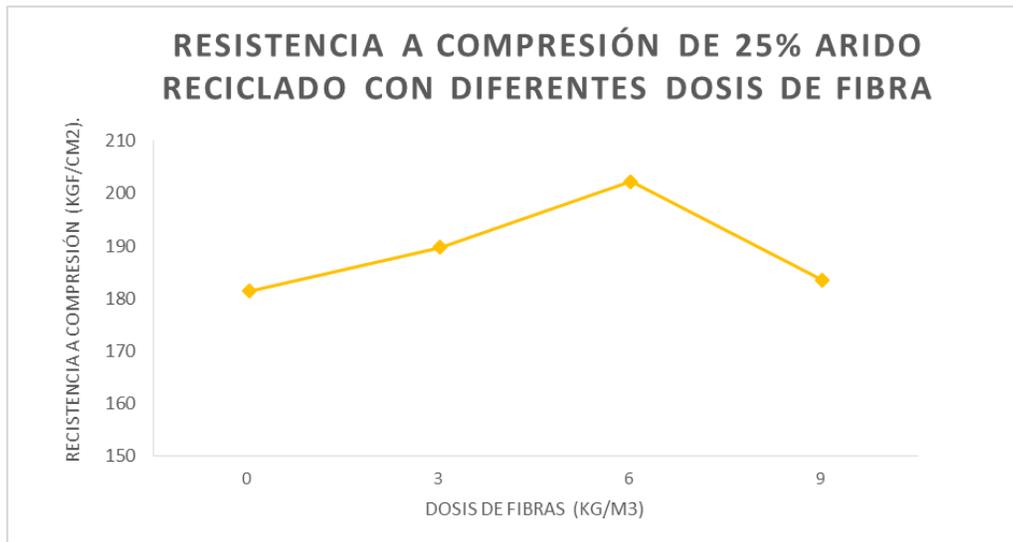


GRÁFICO 12: Variación de resistencia a compresión, con 25% árido grueso reciclado.

Fuente: Elaboración Propia.

En el gráfico 12 muestra un aumento (8.38 kg/cm<sup>2</sup>) entre 0 a 3 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras, esta tendencia se mantiene llegando a su máxima resistencia en 6 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (202.28 kg/cm<sup>2</sup>) y una reducción hacia los 9 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (18.54 kg/cm<sup>2</sup>).

✓ Hormigón 50% de árido grueso reciclado

Hormigón	Resistencia Kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia Relativa, %
50/0	179.49	100
50/3	182.22	102
50/6	198.52	111
50/9	194.87	109

TABLA 40: Resistencia a la compresión a los 28 días, con 50% de árido grueso.  
Fuente: Elaboración Propia.

Los datos de la tabla 40 se presentan en un gráfico que relaciona la resistencia a compresión resultante con cada dosis de fibras trabajadas, en el cual podemos ver el aumento de resistencia según las dosis de fibras para las series de hormigón con 50% de árido grueso reciclado.

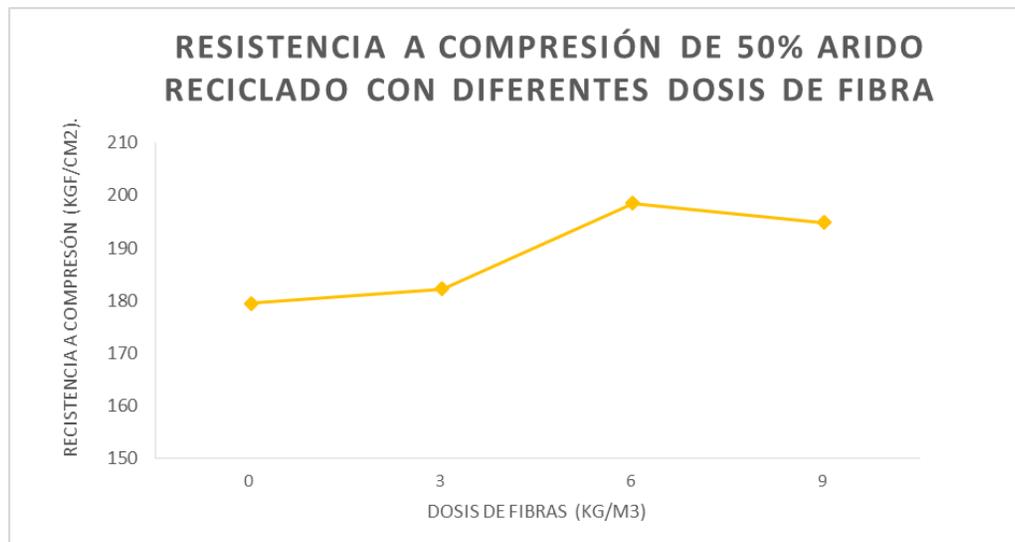


GRÁFICO 13: Variación de resistencia a compresión, con 50% árido grueso reciclado.  
Fuente: Elaboración Propia.

En el gráfico 13 muestra un aumento (2.73 kg/cm<sup>2</sup>) entre 0 a 3 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras, esta tendencia se mantiene llegando a su máxima resistencia en 6 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (198.52 kg/cm<sup>2</sup>) y una reducción hacia los 9 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (3.65 kg/cm<sup>2</sup>).

✓ Hormigón 100% de árido grueso reciclado

Hormigón	Resistencia Kg/cm <sup>2</sup>	Resistencia Relativa, %
100/0	177.58	100
100/3	182.62	103
100/6	198.52	109
100/9	182.69	103

TABLA 41: Resistencia a la compresión a los 28 días, con 100% de árido grueso.  
Fuente: Elaboración Propia.

Los datos de la TABLA 41 se presentan en un gráfico que relaciona la resistencia a compresión resultante con cada dosis de fibras trabajadas, en el cual podemos ver el aumento de resistencia según las dosis de fibras para las series de hormigón con 100% de árido grueso reciclado.

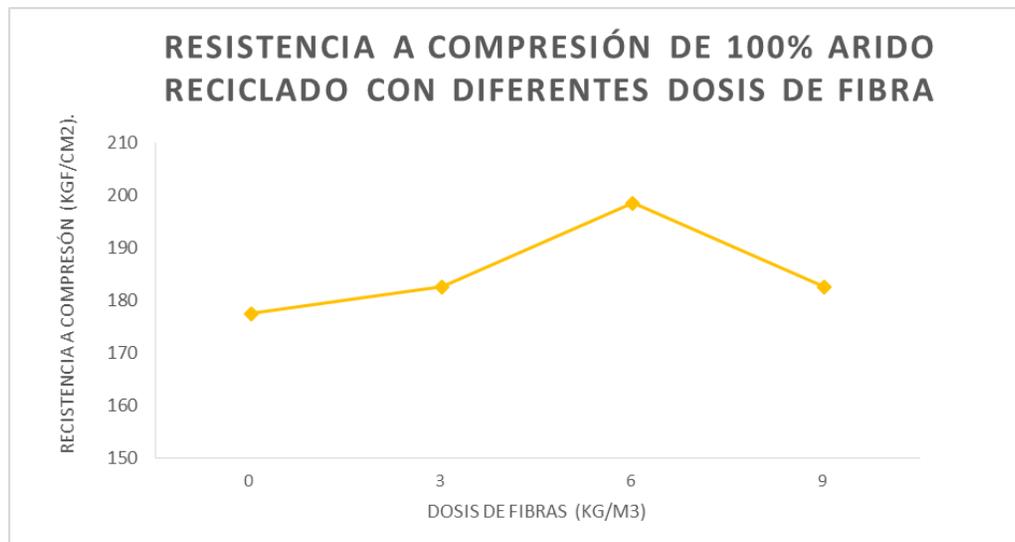


GRÁFICO 14: Variación de resistencia a compresión, con 100% árido grueso reciclado.  
Fuente: Elaboración Propia.

En el gráfico 14 muestra un aumento (5.04 kg/cm<sup>2</sup>) entre 0 a 3 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras, esta tendencia se mantiene llegando a su máxima resistencia en 6 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (198.52 kg/cm<sup>2</sup>) y una reducción hacia los 9 kg/m<sup>3</sup> de dosis de fibras (15.83 kg/cm<sup>2</sup>).

✓ Resultado generales resistencia a Compresión,  $\text{kgf/cm}^2$  - %.

Árido Reciclado, %	Contenido de Fibras, $\text{kg/m}^3$			
	0	3	6	9
0	183 – 100	195 – 100	205 – 100	188 – 100
25	181 – 99	190 – 97	202 – 99	184 – 98
50	180 – 98	182 – 93	199 – 97	195 – 104
100	178 – 97	183 – 94	199 – 97	183 – 97

TABLA 42: Resultados generales Resistencia a compresión a los 28 días.

Fuente: Elaboración propia.

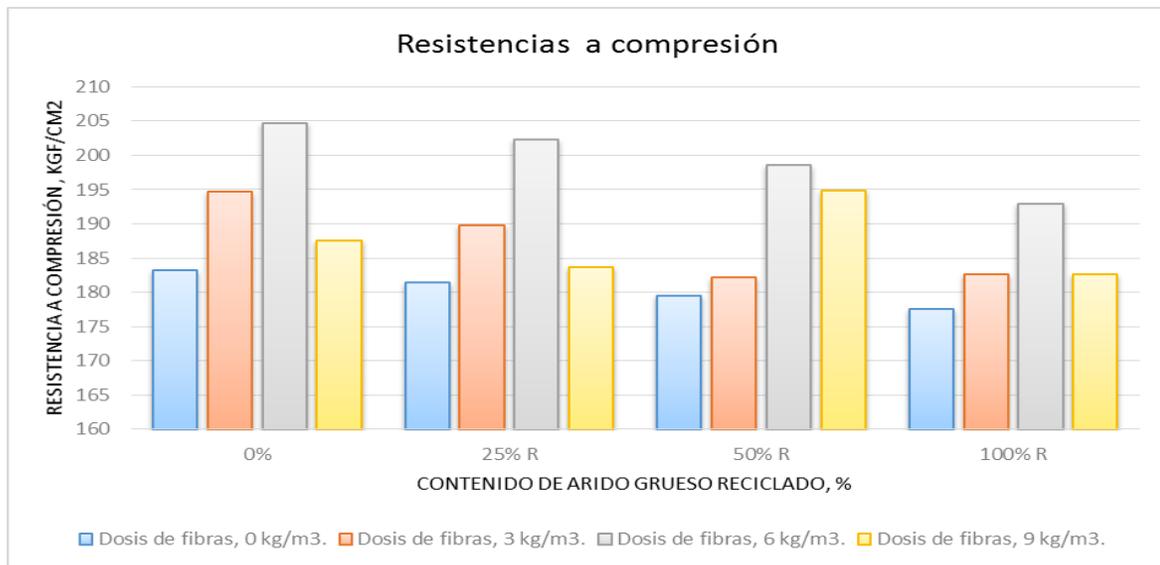


GRÁFICO 15: Resumen de la resistencia a la compresión.

Fuente: Elaboración Propia.

El efecto del contenido de grava reciclada sobre la resistencia a compresión es menor que sobre la resistencia a flexotracción, si bien se observa una reducción de resistencia, este puede considerarse relativamente escasa. Los promedios de reducción de resistencia son los siguientes:

- ✓ Para 0% de grava reciclada: 100%
- ✓ Para 25% de grava reciclada: 98.3%
- ✓ Para 50% de grava reciclada: 98%
- ✓ Para 100% de grava reciclada: 96.3%

El efecto de contenido de fibras poliolefinicas sobre la resistencia a compresión, según puede observarse en tablas 38 a 41, presenta un comportamiento similar en todos los hormigones: a medida que aumenta la dosis de fibra, se verifica un aumento de resistencia hasta llegar al máximo con 6  $\text{kg/m}^3$  de fibra, reduciendo con la dosis de 9  $\text{kg/m}^3$ , por el alto contenido de fibras, también para esta resistencia la dosis optima de fibras es de 6  $\text{kg/m}^3$ .

## *Capítulo V*

### *Conclusiones.*

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES.

El estudio anteriormente expuesto, nos revela que el reciclado de los áridos es un sistema productivo que entrega un material totalmente utilizable en variadas tareas realizadas en el rubro de la construcción, y este material se puede reemplazar por lo mismo al árido natural ocupado comúnmente.

En este trabajo se demuestra que los áridos provenientes del reciclaje no poseen las mismas propiedades físicas del árido natural, punto que se tenía en consideración, pero en general cumplen con los requisitos impuestos por la norma chilena, lo cual no constituye ningún inconveniente para su utilización. Sin embargo, para controlar aquellas propiedades afectadas severamente es indispensable introducir agentes que proporcionen una mejoría a este tipo de hormigón o soluciones a dicho problema, como en esta investigación.

El estudio permitió conocer la influencia de la incorporación de la fibra sobre las características mecánicas del hormigón con árido grueso reciclado variando las dosis de fibras, entre un  $3 \text{ kg/m}^3$  y  $9 \text{ kg/m}^3$ .

De acuerdo a los resultados obtenidos en la experiencia realizada, es posible inferir las siguientes conclusiones:

1. A medida que se aumenta las dosis de fibra se observa una disminución importante en la docilidad de todos los hormigones fabricados. En promedio para hormigones confeccionados con dosis mínima de  $3 \text{ kg/m}^3$  hay una disminución de un 21% y en promedio también para hormigones confeccionados con la dosis máxima de  $9 \text{ kg/m}^3$  hay una disminución en promedio de 52%.

Cabe destacar que hay un leve descenso del cono en las mezclas con árido reciclado respecto de la mezcla de control; pero dicho problema no arrojaría problemas de trabajabilidad del hormigón, ya que en los ensayos realizados este nunca incumplió el parámetro impuesto por la dosificación.

En general, la adición de fibras poliolefinicas determina cierta disminución del asentamiento del hormigón que, sin embargo, le confiere mayor cohesión manteniendo sus condiciones de docilidad satisfactoria.

2. Todas las densidades determinadas están dentro del rango que se recomienda para un hormigón normal ( $2,55 - 2,35 \text{ kg/dm}^3$ ).

La fibra produce una leve disminución de la densidad de los hormigones fabricados, la que va disminuyendo a medida que se adiciona más fibra, esto debido a que la densidad de la fibra es inferior a la del hormigón, como también está directamente relacionado con la presencia del árido reciclado, alcanzando con la dosis mínima de  $3 \text{ kg/m}^3$  en promedio una disminución para los diferentes tipos de hormigones fabricados 0/3, 25/3, 50/3 y 100/3 de un 0,45 %. Con la dosis máxima de fibra  $9 \text{ kg/m}^3$  se produce una disminución en promedio para los diferentes tipos de hormigones 0/9, 25/9 y 100/9 de un 1.21 %. La densidad aparente es prácticamente igual, independientemente del contenido de fibras.

3. La resistencia a la flexotracción aumenta en todos los hormigones confeccionados, debido supuestamente a que la fibra refuerza todos los planos de esfuerzo del hormigón, con la dosis de fibra que alcanza una mayor resistencia es con  $6 \text{ kg/m}^3$ , alcanzando un valor promedio a los 28 días en los tres diferentes hormigones 0/6, 25/6, 50/6 y 100/6 de un 11% mayor al hormigón patrón. Luego comienza a disminuir la resistencia hasta que con la dosis máxima utilizada que es  $9 \text{ kg/m}^3$ . El comportamiento se mantiene tanto en hormigones sin grava reciclada, como en hormigones con diferentes contenidos de grava reciclada.
4. La resistencia a la compresión aumenta al igual que la resistencia a la flexotracción, al aumentar la dosis de fibras crece su resistencia, alcanzando la máxima de  $6 \text{ kg/m}^3$  un aumento en promedio a los 28 días de los diferentes tipos de hormigones confeccionados 0/6, 25/6, 50/6 y 100/6 de un 11 %. Con la dosis máxima de fibra utilizada  $9 \text{ kg/m}^3$  se alcanza un resultado similar con respecto al hormigón patrón, alcanzando en promedio a los 28 días de los diferentes tipos de hormigones confeccionados 0/9, 25/9, 50/9 y 100/9 un 3.75%.
5. De acuerdo a los resultados obtenidos de los ensayos a la compresión, flexotracción y docilidad podemos decir que el contenido óptimo de fibras poliolefinicas es de  $6 \text{ kg/m}^3$ .
6. El contenido de grava reciclada influye sobre las resistencias mecánicas del hormigón disminuyéndolas, tanto más, cuanto mayor es la proporción empleada. La influencia es mayor sobre las resistencias a flexotracción, llegando al 86%, sobre el hormigón patrón o sin grava reciclada; en cambio, sobre las resistencias a compresión llega solo a 96% como máximo, sobre el hormigón patrón o sin grava reciclada.
7. Otra recomendación importante, al momento de confeccionar el hormigón con áridos reciclados se debe tener especial cuidado con el material fino adherido, lo cual implica que este debe ser lavado previamente. Además se debe tener un especial cuidado con la absorción del árido reciclado ya que es muy elevada lo cual implica que el árido pueda tomar parte del agua de amasado dispuesta por la dosificación, lo cual sería perjudicial para el hormigón, una solución efectiva para dicho problema es llevar el árido hasta la condición de saturado superficialmente seco, de manera que no presente problemas, al realizar la mezcla, el agua con los áridos, como también tener los áridos secos y aumentar el agua con la absorción obtenida.
8. Por último, es importante recalcar que el mayor aporte que realiza este trabajo es dar a conocer el uso del árido reciclado, como material agregado en la confección de la mezcla de hormigón, uso que no es muy conocido y practicado en el país.

*Capítulo VI*  
*Bibliografía.*

## CAPÍTULO VI: BIBLIOGRAFIA.

- [1] Munisaga G, “Fisuración por retracción en hormigones: Influencia del tipo de cemento”. Tesis ingeniería civil Universidad de Chile, 2009.
- [2] Valdés G. “Aplicación de los residuos de hormigón en materiales de construcción” Revista Científica Ingeniería y Desarrollo”, Vol 29, No 1, 2011.
- [3] Revista Cemento, “La evolución del hormigón”, 2006. [Web En Linea] [http://www.icpa.org.ar/publico/files/rev24evol\\_horm.pdf](http://www.icpa.org.ar/publico/files/rev24evol_horm.pdf)
- [4] Poon, C.S., Yu, A.T.W. y Ng, L.H., “*On-site sorting of construction and demolition waste in Hong Kong*”, Resources, Conservation and Recycling 32 (2), pp. 157-172, 2002.
- [5] Aguilar, C., Muñoz, M.P. y Loyola O., “*Uso de hormigón reciclado para la fabricación de hormigones*”, Revista Ingeniería de Construcción 20 (1), pp. 35-44, 2005.
- [6] Rakshvir, M.y Barai, S.V., “*Studies on recycled aggregates-based concrete*, Waste Management and Research” 24 (3), pp. 225-233, 2006.
- [7] Conama. 2010 (Comisión Nacional de Medio Ambiente). “Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile”, 2010.
- [8] Marino P. “Contracción por secado del hormigón”. Centro de investigaciones viales LEMac, 2009.
- [9] Ruiz Sibaja A., Lopez Rios J., Martinez Jimenez J. “La influencia de fibras sintéticas en las propiedades de hormigones frescos”, Desarrollos de Productos FITESA S.A, BRASIL, 2005.
- [10] Revista del GPUC. Ingeniería Civil y Construcción, Pontifica Universidad Católica. [www.ing.puc.cl](http://www.ing.puc.cl)
- [11] CSI Cement Sustainability Initiative. Recycling Concrete Full Report. July 2009
- [12] Alaejos Gutiérrez, Pilar. Tipos y Propiedades de Áridos Reciclados en Catálogo de Residuos utilizables en Construcción. Informe CEDEX para el Ministerio de Medio Ambiente, 2008
- [14] SALAS Andres, ROESLER Jeffery, LANGE David. Batching Effects on Properties of Recycled Concrete Aggregates for Airfield Rigid Pavements. University of Illinois at Urbana-Champaign – EE.UU., Abril 2010.

[13] W.Y.V. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam. Micro-structural analysis of recycled aggregate concrete produced from twostage mixing approach. Cement and Concrete Research 35(6), Hong-Kong, 2005.

[15] DE LARRARD François. Construire en béton. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, France, Noviembre 2002.

[16] VIDELA, C. Antecedentes Generales del Hormigón en su Tecnología del Hormigón, Depto Ingeniería y Gestión de la Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile

[17] LATORRE OYANADEL Verónica Valeria. Influencia del Contenido de Adiciones Puzolánicas y del Proceso deElaboración de la Mezcla en la Resistencia Mecánica del Hormigón. Tesis. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2009

[18] <http://www.lebetonrecycle.com/process-de-fabrication.html>

[19] BELTRÁN L., "Hormigón reforzado con fibras de polipropileno", Tesis de Grado de la Escuela Politécnica Nacional, pp. 9, Quito, (1986)

[20] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, Fiber Reinforced Concrete, Publicación SP-44, Detroit, (1982)

[21] ASTM C 116-90. Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Using Portions of Beam Broken in Flexure," in American Society for Testing and Materials.

## ANEXOS

- Resistencia a la flexotracción, hormigón con 0% de árido grueso reciclado.

Hormigón PATRON	Peso kg	Luz De Ensayo Cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
0/0	29.47	45	15.1	15.2	2380	30.6990791
0/0	29.52	45	15.1	15	2280	30.1986755
0/0	29.53	45	15.1	15.1	2280	29.8000175
0/0	29.5066667	45	15.1	15.1	2313.33333	30.2325907

Hormigón M1	Peso kg	Luz De Ensayo Cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
0/3	29.52	45	15.2	15.1	2600	33.7589072
0/3	29.58	45	15	15	2300	30.6666667
0/3	29.55	45	15	15	2600	34.6666667
0/3	29.55	45	15.0666667	15.0333333	2500	33.0307468

Hormigón M2	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
0/6	29.62	45	15	15	2460	32.8
0/6	29.57	45	15	15	2480	33.0666667
0/6	29.61	45	15	15	2580	34.4
0/6	29.6	45	15	15	2506.66667	33.4222222

Hormigón	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
0/9	29.65	45	15	15	2280	30.4
0/9	29.62	45	15	15	2380	31.7333333
0/9	29.65	45	15	15	2180	29.0666667
0/9	29.64	45	15	15	2280	30.4

- Resistencia a la flexotracción, con 25% de árido grueso reciclado.

Hormigón PATRON	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
25/0	29.24	45	15.1	15.2	2290	29.5381895
25/0	28.77	45	15.3	15.4	2300	28.5238062
25/0	29.42	45	15	15.1	2225	29.2750318
25/0	29.1433333	45	15.1333333	15.2333333	2271.66667	29.1123425

Hormigón M1	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
25/3	29.29	45	15.1	15.2	2600	33.5368091
25/3	29.35	45	15	15	2300	30.6666667
25/3	29.3	45	15	15	2400	32
25/3	29.3133333	45	15.0333333	15.0666667	2433.33333	32.0678253

Hormigón M2	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
25/6	29.66	45	15.2	15.2	2500	32.0347809
25/6	29.48	45	15.2	15.2	2550	32.6754766
25/6	29.58	45	15.2	15.3	2525	31.9335681
25/6	29.5733333	45	15.2	15.2333333	2525	32.2146085

Hormigón M3	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
25/9	29.89	45	15.1	15.15	2250	29.2141207
25/9	29.9	45	15.2	15.3	2350	29.7203505
25/9	29.92	45	15	15	2225	29.6666667
25/9	29.9033333	45	15.1	15.15	2275	29.5337126

- Resistencia a flexotracción, con 50% de árido grueso reciclado

Hormigón PATRON	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
50/0	29	45	15	15	1960	26.1333333
50/0	29.1	45	15	15	2120	28.2666667
50/0	29.08	45	15	15	2275	30.3333333
50/0	29.06	45	15	15	2118.33333	28.2444444

Hormigón M1	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
50/3	29.12	45	15.1	15.2	2400	30.9570545
50/3	29.09	45	15.2	15.3	2450	30.9850462
50/3	29.07	45	15.2	15.3	2225	28.1394808
50/3	29.0933333	45	15.1666667	15.2666667	2358.33333	30.0271938

Hormigón M2	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
50/6	29.18	45	15.1	15.2	2300	29.6671773
50/6	29.17	45	15.1	15.2	2400	30.9570545
50/6	29.18	45	15	15.3	2525	32.359349
50/6	29.1766667	45	15.0666667	15.2333333	2408.33333	30.9945269

Hormigón M3	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
50/9	29.25	45	15	15.1	2125	27.9593
50/9	29.24	45	15	15.1	2200	28.9460989
50/9	29.28	45	15	15.1	2150	28.288233
50/9	29.2566667	45	15	15.1	2158.33333	28.3978773

- Resistencia a la flexotracción, con 100% de árido grueso reciclado.

Hormigón PATRON	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
100/0	28.77	45	15.1	15.2	2125	27.409892
100/0	28.97	45	15.2	15.3	2000	25.2939153
100/0	28.9	45	15	15.1	1950	25.6567694
100/0	28.88	45	15.1	15.2	2025	26.1201923

Hormigón M1	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
100/3	28.7	45	15.1	15.2	2150	27.7323614
100/3	29	45	15.1	15.1	2250	29.407912
100/3	29.1	45	15	15	2100	28
100/3	28.9333333	45	15.0666667	15.1	2166.66667	28.3800911

Hormigón M2	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
100/6	29.19	45	15	15.1	2200	28.9460989
100/6	29.19	45	15	14.9	2225	30.0662132
100/6	29.15	45	15	15	2125	28.3333333
100/6	29.1766667	45	15	15	2183.33333	29.1152151

Hormigón M3	Peso kg	Luz De Ensayo cm	Ancho cm	Altura cm	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
100/9	29.19	45	15.1	15.15	2000	25.9681073
100/9	29.22	45	15	15.1	2050	26.9725012
100/9	29.19	45	15	15.1	1925	25.3278365
100/9	29.2	45	15.0333333	15.1166667	1991.66667	26.0894817

- Resistencia a compresión, con 0% de árido grueso reciclado.

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
0/0	15	15.1	226.5	41500	183.222958
0/0	15	15.1	226.5	41000	181.015453
0/0	15	15	225	41700	185.333333
0/0	15	15.0666667	226	41400	183.190581

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
0/3	15	15	225	44000	195.555556
0/3	15	15.1	226.5	43750	193.156733
0/3	15	15	225	44000	195.555556
0/3	15	14.9	223.5	43400	194.183445
0/3	15	15	224.5	43787.5	195.098185

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
0/6	15	15.1	226.5	48000	211.92053
0/6	15	15.2	228	47000	206.140351
0/6	15	15.3	229.5	45000	196.078431
0/6	15	15.2	228	46666.6667	204.713104

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
0/9	15	15.2	228	43400	190.350877
0/9	15	15	225	42200	187.555556
0/9	15	14.8	222	41020	184.774775
0/9	15	15	225	42206.6667	187.560403

- Resistencia a compresión, con 25% de árido grueso reciclado.

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
25/0	15	15.25	228.75	41500	181.420765
25/0	15	15.2	228	41000	179.824561
25/0	15	15.2	228	41700	182.894737
25/0	15	15.2166667	228.25	41400	181.380021

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
25/3	15	15	225	42250	187.777778
25/3	15	14.9	223.5	42550	190.380313
25/3	15	15	225	43000	191.111111
25/3	15	14.9666667	224.5	42600	189.756401

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
25/6	15	15.35	230.25	47000	204.12595
25/6	15	15.15	227.25	44900	197.579758
25/6	15	15.25	228.75	46925	205.136612
25/6	15	15.25	228.75	46275	202.280773

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
25/9	15	15.15	227.25	41750	183.718372
25/9	15	15	225	42000	186.666667
25/9	15	15.3	229.5	41500	180.827887
25/9	15	15.15	227.25	41750	183.737642

- Resistencia a compresión, con 50% de árido grueso reciclado.

Hormigón	Dimensión de placas	dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
50/0	15	15.2	228	41560	182.280702
50/0	15	15.3	229.5	40666	177.1939
50/0	15	15.4	231	41350	179.004329
50/0	15	15.3	229.5	41192	179.492977

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
50/3	15	15	225	41000	182.222222
50/3	15	15	225	42000	186.666667
50/3	15	15	225	40000	177.777778
50/3	15	15	225	41000	182.222222

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
50/6	15	15	225	44666	198.515556
50/6	15	14.9	223.5	44666	199.847875
50/6	15	15.1	226.5	44666	197.200883
50/6	15	15	225	44666	198.521438

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
50/9	15	15.2	228	44333.33	194.44443
50/9	15	15.15	227.25	44333.33	195.086161
50/9	15	15.15	227.25	44333.33	195.086161
50/9	15	15.1666667	227.5	44333.33	194.87225

- Resistencia a compresión, con 100% de árido grueso reciclado.

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
100/0	15	15.3	229.5	41000	178.649237
100/0	15	15.2	228	40000	175.438596
100/0	15	15.3	229.5	41000	178.649237
100/0	15	15.2666667	229	40666.6667	177.579024

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
100/3	15	15.2	228	42000	184.210526
100/3	15	15.1	226.5	42000	185.430464
100/3	15	15	225	40100	178.222222
100/3	15	15.1	226.5	41366.6667	182.621071

Hormigón	Dimensión de placas	Dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
100/6	15	15.05	225.75	44250	196.013289
100/6	15	14.95	224.25	43000	191.750279
100/6	15	15	225	43000	191.111111
100/6	15	15	225	43416.6667	192.958226

Hormigón	Dimensión de placas	dimensión Probeta	Sección cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kg/cm <sup>2</sup>
100/9	15	15.1	226.5	41000	181.015453
100/9	15	15.05	225.75	41000	181.616833
100/9	15	15.1	226.5	42000	185.430464
100/9	15	15.0833333	226.25	41333.3333	182.687583