



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO DE REUTILIZACIÓN DE
FIBRA DE POLIPROPILENO RECUPERADA EN HORMIGÓN
PROYECTADO. CASO ESTUDIO: PROYECTO CHUQUICAMATA
SUBTERRÁNEO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

EDUARDO IGNACIO RIVERA ARÁNGUIZ

PROFESOR GUÍA:
CARMEN PAZ MUÑOZ EFFA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JUAN CARLOS POZO ROJAS
SERGIO GARCIA GUZMAN

SANTIAGO DE CHILE
2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: EDUARDO RIVERA ARÁNGUIZ
FECHA: MARZO DE 2020
PROF. GUÍA: CARMEN PAZ MUÑOZ E.

PROPUESTA DE PROCEDIMIENTO DE REUTILIZACIÓN DE FIBRA DE
POLIPROPILENO RECUPERADA EN HORMIGÓN PROYECTADO. CASO ESTUDIO:
PROYECTO CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEO

El objetivo de esta memoria es evaluar la factibilidad de reutilizar fibras de polipropileno que quedan del lavado de camiones de hormigón proyectado para ser ocupada nuevamente en el uso de hormigón en el Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo (PMCHS). En la actualidad dichas fibras son acumuladas en instalaciones de la mina, siendo catalogadas como un residuo sólido, y en vista del compromiso Plan Maestro de sustentabilidad, es que se busca dar un valor a este residuo.

Para establecer un protocolo de reutilización de esta fibra se estudian 3 dosificaciones distintas (D1: 100% nueva, D2: 50% nueva + 50% reutilizada y D3: 100% reutilizada) para tres ensayos de caracterización que permiten comparar la trabajabilidad, la resistencia a compresión y tenacidad como capacidad de absorción de energía. Se considera el caso de revestimiento de túnel sin malla. El primer ensayo evalúa hormigón fresco (NCh1019: docilidad), y los dos ensayos siguientes son de hormigón endurecido (NCh1037: resistencia a compresión cilíndrica y ensayo EN83515: método Barcelona). Se comparan los resultados entre el desempeño de fibra nueva (D1) y las muestras con fibras reutilizadas, además de incorporar los criterios de calidad en shotcrete de CODELCO. Se estudian complementariamente las condiciones iniciales y finales de la fibra luego de ser recuperada.

Los resultados indican que la docilidad no se ve afectada ante la presencia de fibra reutilizada. En el ensayo de resistencia a compresión se aprecia que D2 presenta un resultado menor y el mejor desempeño lo obtiene D3. En las 3 muestras se supera la resistencia especificada de $f'_c=30$ MPa ya a los 7 días. En el tercer ensayo la capacidad de absorción de energía se ve afectada al momento de tener fibras reutilizadas, disminuyendo su capacidad respecto a D1 en hasta un 20% menos. La principal causa de esta disminución es debido a la falla de extracción (pull-out) que sufren las fibras por los residuos impregnados en la fibra que disminuyen su capacidad de adherencia matriz/fibra.

Al contrastar los requerimientos de calidad para el shotcrete de CODELCO con los resultados, se aprecia que estos logran estar dentro de los márgenes que permite la factibilidad de reutilizar la fibra, por lo tanto, a su vez es posible mantener la línea actual de recuperación entregando adicionalmente sugerencias y consideraciones con respecto al uso y almacenamiento de dichas fibras.

Finalmente, de aprobarse la reutilización de la fibra se lograría ahorrar 21.710 kg de fibra entre los años 2020 a 2024, siguiendo la línea del Plan Maestro de Sustentabilidad de CODELCO que impulsa el compromiso del cuidado del medio ambiente y el desarrollo sustentable.

*A Dios, a mi Madre, familia y amigos que son
familia*

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a Dios por iluminarme en este largo camino que fue necesario recorrer para llegar a este momento. Luego agradecer todo el esfuerzo hecho por mi madre, la mujer más importante para mí, que siempre supo guiarme y ser mi cable a tierra. Agradecer a mi familia cercana que siempre han sido una inyección de buena energía.

También quiero agradecer a las bellas personas que pude conocer gracias a la vida universitaria que hoy llamo como amigos/as. Mencionar a las amigas y amigos hechos en la sección de los cuales muchos han perdurado en la amistad hasta el día de hoy, a los buenos conocidos del colegio que ahora son grandes amigos, a mis increíbles amigos de civil que han sido grupo de muchas aventuras, de mucho estudio, hasta marearnos de tanto estudiar al terminar la semana. A los que han sido mis amigos de mucho tiempo y a todos aquellos con que he compartido risas y buenas conversaciones.

Por último, agradecer a mi comisión completa desde mi profesora guía Carmen Muñoz, mi profesor coguía Juan Carlos Pozo y a Don Sergio García de CODELCO que siempre mostraron una gran disposición para reunirnos a gestionar, discutir, conversar y analizar mi trabajo. Mencionar también la buena disponibilidad mostrada por los laboratorios Geholab y Llay-Llay que fueron necesarios para el desarrollo de mi investigación.

Solo queda agradecer a todos los acontecimientos que me han hecho ser la persona que soy actualmente, aprendiendo de los errores y aprovechando las capacidades que he descubierto y apreciado, esperando por siempre soñar en grande, trabajar duro y mantenerme humilde.

Tabla de Contenido

1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes generales.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivos generales.....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
1.3. Alcances.....	3
1.4. Motivación.....	4
2. Marco teórico.....	6
2.1. Hormigón proyectado.....	6
2.1.1. Tipos de shotcrete.....	6
2.1.2. Desarrollo internacional y nacional.....	8
2.1.3. Ventajas y usos principales.....	9
2.2. Fibras de refuerzo de polipropileno en shotcrete.....	11
2.2.1. Características principales de la fibra y comportamiento mecánico de estas en el hormigón.....	12
2.2.2. Desempeño a la compresión del HRFP.....	17
2.2.3. Desempeño a la flexión del HRFP.....	17
2.2.4. Desempeño a la tracción/tensión y fisuración del HRFP.....	18
2.2.5. Desempeño a la tenacidad (absorción de energía) e impacto del HRFP.....	19
2.2.6. Influencia del módulo de elasticidad y las deformaciones del HRFP.....	20
2.2.7. Desempeño comparativo entre fibra de acero y de polipropileno.....	20
2.2.8. Beneficios de las fibras de polipropileno en el hormigón proyectado.....	22
2.3. Proceso de recuperación de la fibra de polipropileno.....	23
2.4. Normas y guías.....	24
2.4.1. Docilidad: Determinación según NCh1019 - Antecedentes de guía chilena del shotcrete.....	24
2.4.2. Resistencia a la compresión: Determinación según NCh1037 - Antecedentes de guía chilena del shotcrete.....	25

2.4.3. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción según EN 83515:2010	27
2.4.4. Bases de requisitos de control de calidad para shotcrete de fortificación de CODELCO	30
2.5. Especificaciones técnicas de materiales del experimento.....	32
2.5.1. Fibra de polipropileno Barchip54	33
2.5.2. Cemento Melón Extra	34
2.5.3. Áridos Cachapoal.....	35
2.5.4. Aditivos Plastocrete CB-400R y Sika Viscocrete PES.....	36
3. Metodología.....	37
4. Resultados	41
4.1. Resultados de determinación de docilidad mediante método del asentamiento del cono de Abrams	41
4.2. Resultados de resistencia a compresión según norma NCh1037:2009	42
4.3. Resultados de Absorción de energía según EN 83515:2010	43
4.4. Análisis de condición física de la fibra.....	48
4.5. Análisis de resultados	50
4.5.1. Trabajabilidad - NCh1019	50
4.5.2. Ensayo a compresión - NCh1037	50
4.5.3. Ensayo Barcelona - EN83515.....	52
5. Propuesta Procedimiento de reutilización	59
6. Conclusiones.....	61
7. Bibliografía.....	64
8. Anexos.....	68
8.1. Plan maestro de sustentabilidad – Política Corporativa de sustentabilidad.....	68
8.2. Ficha técnica Barchip54	69
8.3. Fichas técnicas de cemento Melón Extra y Polpaico P400	71
8.4. Informe de granulometría áridos Cachapoal.....	75
8.5. Resultado de ensayo a compresión para las 9 probetas ensayadas	76
8.6. Información complementaria de probetas D1, D2 y D3.....	77

8.7. Registros fotográficos de planta de dosificación y piscina de lavado78

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Proyección de cantidades necesarias de shotcrete por año en PMCHS	9
Tabla 2.2: Desempeño comparativo entre fibras de polipropileno y acero	21
Tabla 2.3: Resistencias recomendadas por aplicación (medidas en cilindros a 28 días).....	27
Tabla 2.4: Propiedades de Fibra Barchip54.....	33
Tabla 2.5: Tabla comparativa de cemento usado en probetas y en obra	34
Tabla 3.1: Nomenclatura de dosificación de fibras en probetas de ensayo	38
Tabla 3.2: Resumen de componentes de la mezcla por m ³	38
Tabla 3.3: Resumen de dosificación en betonera para 60 lts.....	39
Tabla 4.1: Resultados de asentamiento de Abrams según NCh1019	41
Tabla 4.2: Resultados de carga, resistencia y energía para D1	45
Tabla 4.3: Resultados de carga, resistencia y energía para D2.....	46
Tabla 4.4: Resultados de carga, resistencia y energía para D3.....	47
Tabla 4.5: Resistencia directa teórica a compresión aplicando tolerancia entre probeta moldeada y mediante testigo.....	51
Tabla 4.6: Tabla comparativa de resultados ensayo Barcelona	52
Tabla 4.7: Correlación de resultados de capacidad de absorción de energía entre ensayo EFNARC y Barcelona	56
Tabla 8.1: Registro de probetas D1 de ensayo.....	77
Tabla 8.2: Registro de probetas D2 de ensayo.....	77
Tabla 8.3: Registro de probetas D3 de ensayo.....	77

Índice de Figuras

Figura 2.1: Esquema de proyección por vía seca.	7
Figura 2.2: Esquema de proyección vía húmeda.	8
Figura 2.3: Modos de falla de la fibra de refuerzo e internas de la matriz de hormigón.	13
Figura 2.4: Distintas formas y relieves de las fibras de polipropileno.	14
Figura 2.5: Curvas típicas de esfuerzo-deformación de hormigón reforzado con fibra (HRF).	15
Figura 2.6: Fenómeno de agrietamiento para ablandecimiento y endurecimiento.	16
Figura 2.7: Esquema de esfuerzos con y sin fibra.	18
Figura 2.8: Curva esfuerzo deformación de modelo (a) frágil, (b) dúctil y (c) cuasi frágil.	19
Figura 2.9: Diagrama de flujo de proceso de recuperación de fibra de polipropileno.	23
Figura 2.10: Medida de asentamiento.	24
Figura 2.11: Formas de asentamiento.	25
Figura 2.12: Sección y altura de ensayo de probeta cilíndrica.	26
Figura 2.13: Dimensiones de probeta para método Barcelona.	27
Figura 2.14: Esquema representativo de zona cónica de esfuerzos y plano de fisuración.	28
Figura 2.15: Dimensiones de la probeta y punzón, cadena extensométrica y plano de falla. .	28
Figura 2.16: Esquema de pruebas de control de tenacidad.	29
Figura 2.17: Correlación no lineal entre ensayo EFNARC y Barcelona en fibra Barchip54. ...	30
Figura 2.18: Métodos de medición de trabajabilidad.	31
Figura 2.19: Requisitos de temperatura ambiente y del shotcrete.	31
Figura 2.20: Parámetros de medición y requisitos para resistencia final a compresión.	31
Figura 2.21: Métodos de obtención de absorción de energía.	32
Figura 2.22: Requisitos de absorción de energía – Panel cuadrado EFNARC EN 14488-5. ...	32
Figura 2.23: Comparación de resultados en fibra sintética, metálica y malla de acero.	34
Figura 2.24: Curva granulométrica de áridos Cachapoal y áridos Baeza.	35
Figura 4.1: Registro de temperatura del hormigón y temperatura ambiente.	42
Figura 4.2: Gráfica de resumen de resultados de ensayos a compresión para D1, D2 y D3. ...	42

Figura 4.3: Evolución de resistencia a compresión de probetas de ensayo.	43
Figura 4.4: Gráfico de carga y energía versus deflexión circunferencial para D1 (1).....	45
Figura 4.5: Gráfico de carga y energía versus deflexión circunferencial para D1 (2).....	45
Figura 4.6: Gráfico de carga y energía versus deflexión circunferencial para D2 (1).....	46
Figura 4.7: Gráfico de carga y energía versus deflexión circunferencial para D2 (2).....	46
Figura 4.8: Gráfico de carga y energía versus deflexión circunferencial para D3 (1).....	47
Figura 4.9: Gráfico de carga y energía versus deflexión circunferencial para D3 (2).....	47
Figura 4.10: (a) Fibra Barchip54 nueva – (b) Fibra Barchip54 recuperada.	48
Figura 4.11: Fotografías en microscopio con lente Leica Plan 4x/0.10 de fibra Barchip54 nueva.....	49
Figura 4.12: Fotografía en microscopio con lente Leica Plan 4x/0.10 de fibra Barchip54 recuperada.....	49
Figura 4.13: Imagen indicativa del sector de surcos en la fibra Barchip54.....	50
Figura 4.14: Gráfica comparativa de resultados porcentuales de fisuración y energía en ensayo Barcelona.....	53
Figura 4.15: Curvas de energía para D1, D2 y D3 con mejor desempeño.	54
Figura 4.16: Curvas de energía para D1, D2 y D3 con desempeño.....	54
Figura 4.17: Curvas de desarrollo para la totalidad de las muestras entre 2 mm y 6 mm de deformación.....	55
Figura 4.18: Curvas de resistencia residual de tracción en ensayo Barcelona.....	55
Figura 4.19: Patrones de falla en probetas D1, D2 y D3.	57
Figura 4.20: Distribución interior de áridos y fibras en las probetas.....	58
Figura 8.1: Gráfico y tabla de resultados de ensayo a compresión NCh1037:2009.....	76
Figura 8.2: Vista amplia de planta de dosificación de PMCHS	78
Figura 8.3: Segunda vista de planta de dosificación de PMCHS	78
Figura 8.4: Incorporación de fibra de polipropileno a la planta dosificadora.....	79
Figura 8.5: Piscina de lavado de descarga de camión mixer	79
Figura 8.6: Piscina de lavado con presencia de árido	80
Figura 8.7: Piscina de lavado vacía	80
Figura 8.8: Vista completa de la piscina de lavado	81

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes generales

La minería del Cobre en Chile es un pilar fundamental en el desarrollo económico, científico y de innovación para el país. Su importancia llega a ser tal, que en los últimos 20 años es el responsable del 10% total del PIB nacional, significando 7,8% para los ingresos fiscales (International Copper Association, 2018). Sin embargo, todo este desarrollo va acompañado de consecuencias medio ambientales importantes que afectan tanto al país como al planeta. Esta consecuencia impulsa a CODELCO a activar planes de gestión medio ambiental en sus divisiones. De esta forma en noviembre del año 2016 el directorio de CODELCO confirma la Política Corporativa de Sustentabilidad y el Plan Maestro de Sustentabilidad PMS, reafirmando su compromiso con el medio ambiente (véase Anexo 8.1).

Dentro de los efectos de la producción del cobre están los diversos residuos sólidos que se generan. Sólo en los años 2017 y 2018 CODELCO produjo 730.275 toneladas de residuos sólidos, de los cuales 260.804 toneladas son provenientes de la División Chuquicamata (CODELCO, 2018), siendo éstos divididos en categorías de peligrosos y no peligrosos. Dentro del Plan Maestro de Sustentabilidad que impulsa Codelco, está el “aumentar la valorización de residuos para identificar si tienen potencial de reutilización, reciclaje o valorización energética” (CODELCO, 2018, pág. 45). En el marco de dicha visión, se detectó en el proceso post fortificación de túneles mediante shotcrete, la recuperación de fibras de polipropileno en las piscinas de tratamiento de lavado de los camiones mixer.

Las fibras de polipropileno son un medio de refuerzo para el hormigón proyectado que se añaden al material para mejorar la resistencia al impacto, controlar la retracción y como función principal proporcionar capacidad de carga después de la fisuración del hormigón proyectado (ICH, 2015). Son utilizadas generalmente en la minería para revestimientos de túneles sobre roca, y su avance en conjunto con aditivos ha permitido la masificación de su uso. Sin embargo, al recurrir a la recuperación y almacenamiento de las fibras de refuerzo se contribuye a generar un residuo plástico

que debido a sus dimensiones y características pasa a ser un residuo sólido potencialmente orientado a transformarse en un mesoplástico (4,76 – 200 mm) a microplástico mediano (1,01 – 4,75 mm) en las capas terrestres y/o marítimas.

En principio, existe una incertidumbre en volver a reutilizar dicha fibra en una nueva mezcla de shotcrete y actualmente no existen estudios locales ni internacionales que relacionen la recuperación y reutilización de esta fibra luego de pasar por un proceso de contacto y amasado del hormigón además de los aditivos integrados. Es necesario agregar que los estándares de seguridad establecidos por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) hacen que esta decisión no sea arbitraria, comprometiendo la seguridad de trabajadores como la continuidad de la faena.

Dicho esto, un estudio preliminar es sumamente relevante para validar si el comportamiento entre una fibra nueva y recuperada es similar o existen diferencias, además de identificar las condiciones fisicoquímicas (para efecto de esta investigación quedan fuera del alcance las condiciones químicas de las fibras) que pueden afectar el estado de la fibra y por último poder determinar si la actual dosificación usada alcanza los mismos resultados de una fibra nueva, manteniendo una línea de proceso lo más simplificada de recuperación y reutilización en las fibras de polipropileno.¹

Por último, la línea de proceso simplificada de recuperación en la fibra considera la situación actual del agua en Chile que da cuenta de una frágil situación de sequía, desertificación y suelo degradado en un 76% de la superficie chilena, apareciendo Chile entre los países con mayor Riesgo Hídrico al 2025 (EH2030, 2018). Esto hace que el recurso hídrico sea considerado escaso y, por lo tanto, en la propuesta de procedimiento de recuperación de la fibra de polipropileno no se contemple la incorporación adicional de recursos hídricos a los ya usados actualmente.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

Evaluar la factibilidad y proponer un procedimiento que permita reutilizar la fibra de polipropileno desechada del lavado de camiones de hormigón, en nuevos hormigones proyectados para Chuquicamata subterráneo.

¹ Es importante dejar en claro la diferencia entre reciclar y reutilizar para esta memoria. Reciclar implica que el producto pasa por un proceso industrial, en el cual sus procesos productivos se usan como materia prima para un nuevo producto. Reutilizar, es utilizar un producto para otorgarle un nuevo uso sin ser sometido a procesos fisicoquímicos que lo modifiquen. (Fuente: Entrevista a Ingeniera Mariana Bruning G. Profesora curso Introducción a la Sustentabilidad en la Ingeniería 2017-2019, FCFM, Universidad de Chile)

1.2.2. Objetivos específicos

- Estudiar y analizar los efectos y resultados de ensayos de hormigón fresco y endurecido para el hormigón proyectado.
- Confeccionar y ensayar hormigones de prueba que establezcan la aplicabilidad del proceso de reutilización en los ensayos de control y caracterización de la fibra.
- Interpretar los resultados de las probetas de ensayo y contrastar con la fibra nueva, además de los requerimientos de calidad de Codelco para establecer el nivel de factibilidad del uso de las fibras de polipropileno reutilizadas.
- Determinar las ventajas y beneficios que implica la reutilización de las fibras de polipropileno en los trabajos del proyecto minero Chuquicamata Subterráneo (PMCHS).

1.3. Alcances

La presente investigación busca comparar el desempeño de la fibra Barchip54 nueva con respecto a la misma fibra recuperada. La comparación se efectúa acorde a su desempeño en el hormigón proyectado, sin uso de mallas de acero. El desempeño queda limitado a su comportamiento de docilidad, compresión además de fisuración y tenacidad a través de ensayos normados especificados en el subcapítulo 2.4 Normas y Guías.

La condición de la fibra recuperada en su estado natural (o sea no mezclada con hormigón) queda limitada a un análisis cualitativo de su condición física, excluyendo de esta investigación los cambios químicos que pueda sufrir la fibra en su estado recuperado.

Las pruebas de resistencia inicial y temprana de la fibra de polipropileno recuperada en el shotcrete quedan excluidas para efectos de este trabajo, debido a que se desea caracterizar a un mediano plazo el comportamiento.

Por último, es necesario establecer que los resultados y conclusiones sirven como una proyección del comportamiento esperado para un tipo de fibra de polipropileno con características similares a la mencionada en las especificaciones técnicas. Para microfibras con longitudes igual a la mitad o menor a la estudiada en esta investigación (macro fibra de largo 54 mm) se recomienda hacer nuevos ensayos de validación.

1.4. Motivación

El hormigón proyectado (inglés: shotcrete) remonta sus inicios a principios del siglo XX, con más de 100 años de desarrollo que en la actualidad es un mercado que se estima con una proyección de 8,3 mil millones de dólares para el año 2021 (MarketsandMarkets, 2016), evidenciando un importante potencial para su uso en diversas obras futuras. En lo que a Chile respecta, esta tecnología del hormigón recae en la década del setenta, la cual transcurre con una escasa mano de obra calificada y una baja experiencia, sin embargo, con el transcurso de los años su uso se empieza a masificar especialmente con el avance y desarrollo que va exigiendo la minería.

El shotcrete para lograr su masificación tuvo la necesidad de atender los requerimientos del mercado de la construcción tanto en la mejora de sus propiedades como en los equipos necesarios para su funcionamiento. Dentro de estas mejoras es que surge la incorporación de fibras en la mezcla permitiendo mejoras en la compactación, distribución más uniforme sobre el terreno, mayor ductilidad, reducción del efecto rebote (Putzmeister, 2016), entre otras (propiedades mencionadas con mayor extensión en los siguientes capítulos). La materialidad de dicha fibra va desde metálicas, sintéticas y de origen natural. Los avances que ha tenido el estudio de hormigones con fibras han permitido disminuir espesores de revestimientos, prescindir de mallas electrosoldadas en roca y ahorrar tiempo en la colocación que lo hacen una tecnología del hormigón interesante para el mercado.

Entrelazando el aumento del shotcrete para diversas obras de construcción, como la masificación del uso de fibras, es que los desechos que se generan van proporcionalmente en aumento si no existe una acción mitigadora para atacar este punto de contaminación, más aún, considerando que el polipropileno, comúnmente llamado plástico, está generando un gran daño en el medio ambiente a nivel planetario.

En el ámbito global los niveles de masa de plásticos que se han creado llegan a 8,3 mil millones de toneladas, de las cuales 6,3 mil millones se han convertido en residuos y solo un 9% se ha reciclado (Acosta Barriga, 2019), cifra alarmante, que revoca en aprovechar cada oportunidad para poder rechazar o contrarrestar en máxima medida su polución. El desarrollo de esta tesis apunta a aprovechar dicha oportunidad, identifica un residuo de polipropileno presente en el proceso de las faenas mineras de túneles y buscar generar un valor agregado que permita su reaprovechamiento.

Estas medidas de investigación y acción no sólo debe identificarse como la posible solución a un problema sino como la metamorfosis en dirección a una economía circular, entendiendo que en este caso particular el éxito y continuidad de este estudio puede generar para CODELCO un beneficio económico y sustentable fortaleciendo el concepto de economía circular en torno al uso de fibra de polipropileno reutilizada no sólo en una división, sino a nivel general de la empresa.

Finalmente, el estar conscientes del cambio climático acelerado por el efecto antropogénico ha generado el inicio del cambio y cuestionamiento en las personas y empresas sobre nuestras acciones en la explotación de nuestro medio. La minería también se ha visto obligada a ser parte de este cambio, especialmente por las cantidades de recursos que necesita en su funcionamiento. De esta forma estar presente en el desarrollo de estos cambios, aprovechando los conocimientos ingenieriles, con beneficios sustentables es enriquecedor para la labor final de un estudiante que pretende ser un profesional que contribuya a la sociedad.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1. Hormigón proyectado

El hormigón proyectado (tamaño máx. de árido de 12-16 mm) está definido como “hormigón colocado por proyección neumática de alta velocidad desde una boquilla” (ACI, 2018). Es conocido también como mortero proyectado (tamaño máx. de árido 6 mm) o Gunita (inglés: Gunitite) siendo este último el nombre patentado por la compañía estadounidense Cement Gun Company en 1907 (Putzmeister, 2015).

Es a inicios del siglo XX que surge el shotcrete, ante la necesidad de Carl Ethan Akeley, empleado de Cement Gun Company, de tener una máquina que proyectara material sobre mallas para construir modelos de dinosaurios. La empresa patentó el nombre Gunitite, compuesto por un mortero con agregados finos y un alto porcentaje de cemento (Melbye, 2010). A comienzo de los años treinta, nace el término general de Shotcrete (español: Hormigón Proyectado), difundido por el “American Railway Engineering Association” (Asociación Americana de Ingenieros de Ferrocarriles). Ya en 1966, el Instituto Americano del Hormigón (ACI) adopta el término Shotcrete para todas las aplicaciones neumáticas de mortero y hormigón (ICH, 2015).

2.1.1. Tipos de shotcrete

En la actualidad el método de inyección del hormigón proyectado permite clasificarlos según proceso de proyección por vía seca o por vía húmeda.

Las primeras aplicaciones de shotcrete se hicieron mediante la vía seca; en este método se coloca la mezcla de cemento y arena en una máquina, y la misma se transporta por mangueras mediante la utilización de aire comprimido; el agua necesaria para la hidratación es aplicada en la boquilla (Melbye, 2010). En la siguiente figura se presenta un esquema del método de proyección vía seca.

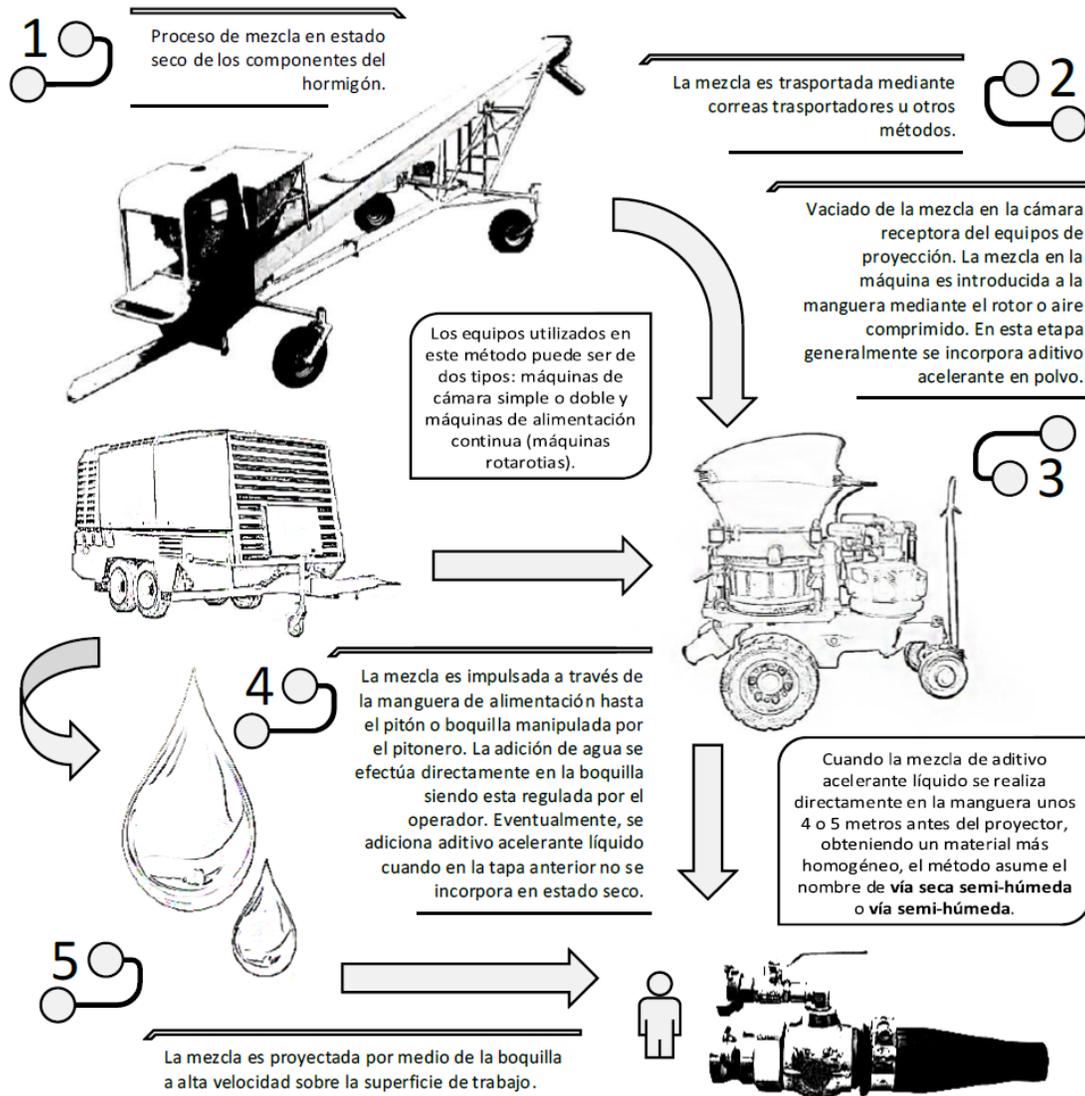


Figura 2.1: Esquema de proyección por vía seca.
Fuente: (Tenorio Rojas, 2016)

El método por vía húmeda comenzó después de la Segunda Guerra Mundial. En este método se preparan las mezclas con toda el agua necesaria para hidratarlas, y se bombea en equipos especiales a través de las mangueras. La proyección del material se efectúa mediante la aplicación de aire comprimido a la boquilla (Melbye, 2010).

En la siguiente figura se presenta un esquema del método de proyección vía húmeda.

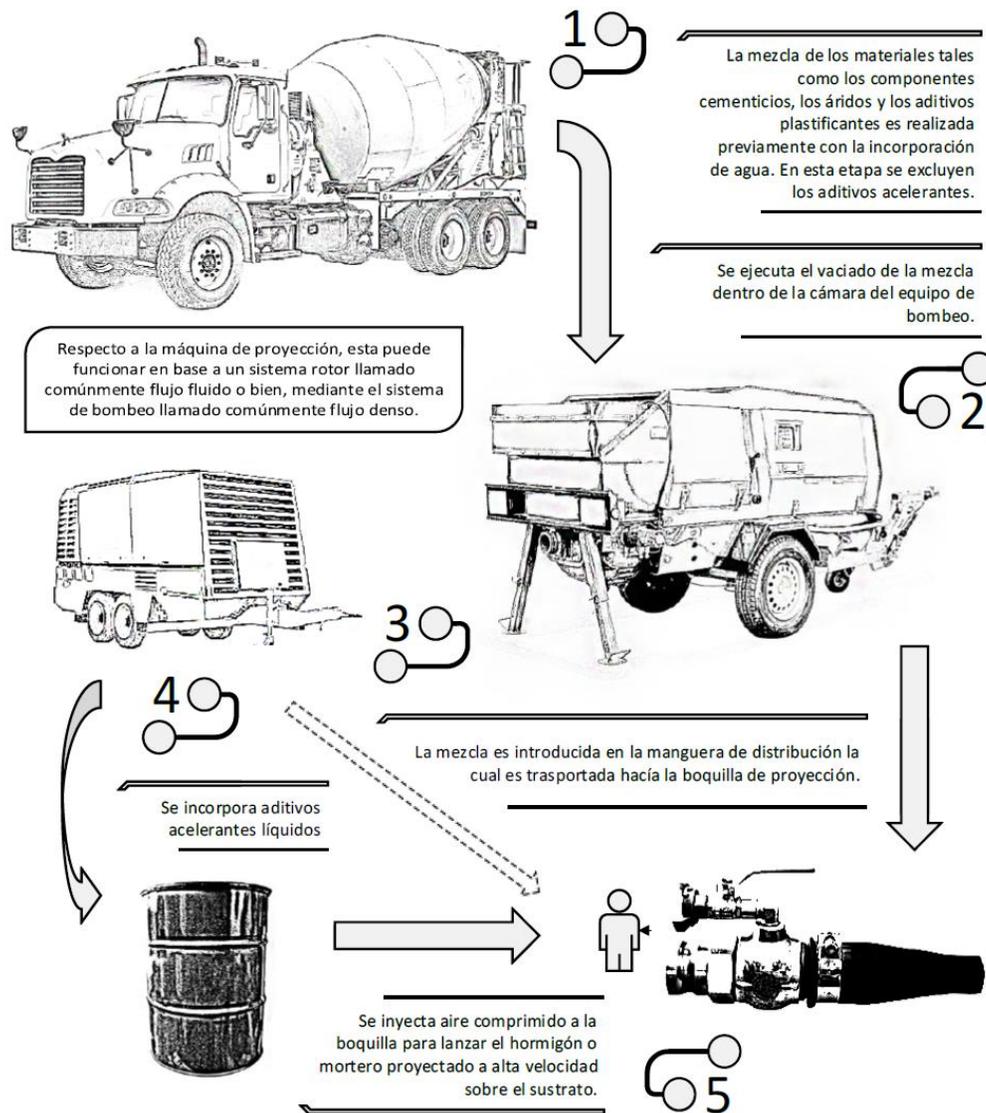


Figura 2.2: Esquema de proyección vía húmeda.
Fuente: (Tenorio Rojas, 2016)

2.1.2. Desarrollo internacional y nacional

A nivel internacional, actualmente, para el hormigón proyectado se tiene pronosticado generar USD 8,30 mil millones a nivel global para el año 2021, estando impulsado este mercado por sus desarrollos tecnológicos y el aumento de las actividades de construcción subterránea (MarketsandMarkets, 2016).

Dentro de la clasificación de shotcrete, el método por vía húmeda es el que presenta el mayor crecimiento, representando el 80% del mercado actual, además de ser el método más popular en

ser utilizado en túneles mecánicos y minería (MarketsandMarkets, 2016). En regiones del mundo como Italia o Escandinavia predomina este método incluso en un 100% de uso con respecto al método vía seca (Melbye, 2010).

Con respecto al ámbito nacional referente a shotcrete, recién en el año 2014 se confecciona la primera edición de una Guía de Hormigón Projectado Chilena, la cual pretende ser una guía de recomendaciones técnicas de carácter práctico para aplicaciones de obras civiles y minería (ICH, 2015). No obstante, el primer equipo de hormigón proyectado arriba a Chile a mediados de los años 70' en la División El Teniente de CODELCO de proyección vía seca (ICH, 2015). Es decir, existe una brecha de más de 40 años para que este documento se confeccione, agregando a esto que en la actualidad no se cuenta con una norma chilena específica para hormigón proyectado.

Actualmente, el hormigón proyectado (o también llamado shotcrete) en Chile dejó de tener aplicaciones únicamente en minería y a medida que se conoce más su sistema y se domina mejor las técnicas de aplicación, su uso se amplía a diversas obras urbanas, siendo el desarrollo de las líneas de Metro de Santiago la que ha permitido los avances en nuevos equipos, procesos y materiales en obras civiles (ICH, 2015).

En el contexto local del shotcrete en el Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo (PMCHS), las proyecciones actuales indican un consumo al 2024 de un total de 620.521 metros cúbicos de shotcrete. El desglose de la cantidad por año se presenta a continuación:

Tabla 2.1: Proyección de cantidades necesarias de shotcrete por año en PMCHS

Shotcrete	
Año	Cantidad (m³/Año)
2020	59.265
2021	91.762
2022	86.030
2023	8.823
2024	14.641

Fuente: (García Guzman, 2019)

2.1.3. Ventajas y usos principales

Para entender el uso que se da en cada industria u obra al hormigón proyectado, es necesario entender generalidades de este material de construcción acorde a las ventajas que presenta.

En primer lugar, se destaca la gran versatilidad que presenta el material, contando además con una forma eficiente de colocación y una excelente adherencia a múltiples sustratos, incluyendo roca, hormigón, albañilería y acero. También se adapta en aplicaciones como revestimientos, edificación y soporte de suelos. Es además capaz de permanecer en su lugar sin hundimiento, incluso en paredes verticales mediante un correcto diseño y aplicación (ICH, 2015).

Al hacer una comparación con respecto al hormigón moldeado, el shotcrete presenta las siguientes ventajas:

- La colocación y compactación se efectúan en una sola etapa.
- Los moldajes generalmente no son necesarios.
- Permite un rápido proceso de colocación y puesta en servicio.
- En obras de sostenimiento o tunelería permite acortar los ciclos de trabajo.

La proyección vía húmeda también ha posibilitado el desarrollo de equipos robóticos que permiten alcanzar a disminuir el rebote a 10% mientras que la vía seca tiene un rebote de 30%. Un ejemplo internacional lo otorga la experiencia mexicana, que con esta disminución de rebote ha logrado ahorros en algunas aplicaciones de hasta un 40% en obras de minería (Bracamontes, 2014).

Además, el proceso de aplicación se ve favorecido al poder controlar factores relevantes para la calidad final del hormigón proyectado, como el ángulo y distancia uniforme de la boquilla de proyección respecto al sustrato y el espesor de la capa proyectada, facilitar la aplicación en altura o difícil acceso y obtener mayor velocidad de producción, a su vez, otorgando una mayor seguridad para el operador (ICH, 2015).

Sus usos principales se han desarrollado en:

- Tunelería
- Soporte de suelo en minería
- Edificación
- Excavaciones para subterráneos y estacionamientos
- Relleno de hundimientos o superficies sobre excavadas
- Estructuras civiles complejas
- Canales, embalses y aliviaderos

- Estabilización de taludes
- Reparación, restauración y reforzamiento

2.2. Fibras de refuerzo de polipropileno en shotcrete

Definimos este tipo de fibras de refuerzo como elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan al hormigón como un material más dentro de la dosificación, las cuales quedan distribuidas en la masa de forma aleatoria y tridimensional confiriéndole ciertas propiedades específicas. Pueden clasificarse de acuerdo con su materialidad, tipo y aplicaciones. Las fibras más usadas actualmente son de acero y de materialidades sintéticas como polipropileno (CTES, 2015).

Como nos indica CTES (2015), una manera de clasificación de las fibras es en microfibras y macrofibras, en el cual el desempeño estructural es la clave principal para diferenciar cada una. Las primeras suelen tener usos no estructurales, entregando mejoras al hormigón como un control de fisuración por retracción, mayor resistencia al fuego, abrasión, entre otros; mientras que las segundas entregan una mayor ductilidad al hormigón en donde las fibras son capaces de aportar en la capacidad de absorción de energía luego de ocurrida la fisura (CTES, 2015). Como consecuencia, esto significa que las fibras de refuerzo son capaces de absorber cargas luego de ocurrida la fisuración (Nazar, 2016).

Remontándonos al origen de su uso como un refuerzo estructural en construcciones, existen evidencias de su uso en la vida animal silvestre como en antiguas civilizaciones. Los horneros (*furnarius rufus*), aves nativas del cono sur de América, son un ejemplo silvestre de la adición de fibras orgánicas al barro logrando moldear sus característicos nidos en forma de horno y la cultura egipcia hace 5000 años ya evidenciaba el uso de heno para mejorar sus ladrillos (Nazar, 2016).

Sin embargo, las fibras de refuerzo en el hormigón son de reciente uso en comparación al hormigón tradicional, siendo recién en la década de los años 60' que se comenzó a estudiar el material, con publicaciones y pautas de diseño (Nazar, 2016). Bajo la misma línea, el uso de hormigones reforzados con fibras de polipropileno (HRFP) ha sido usado tradicionalmente en pavimentos y construcción subterránea donde el propósito final ha sido otorgar durabilidad al elemento, ante la evidencia efectiva que se tiene del control de fisuración a tempranas edades del hormigón y también la disminución de fisuración en su estado endurecido con las fibras (Hidalgo Yañez, 2017).

En la actualidad, con los avances presentados en la materialidad de las fibras, las mejoras en sus propiedades y el aumento del estado del arte relacionadas al uso de fibra como refuerzo en hormigón proyectado, logra otorgar un futuro alentador para la expansión en el uso de dichas fibras, tanto en las obras civiles como industriales de construcción.

2.2.1. Características principales de la fibra y comportamiento mecánico de estas en el hormigón

Existe una gran variedad de tipos de fibras de polipropileno que conllevan a que en el estado del arte no exista una convergencia única en las conclusiones respecto a sus comportamientos, por tanto, los desempeños están directamente relacionadas con las características de la fibra en el hormigón. Sin embargo, existen efectos que son comunes en mayor o menor medida que serán vistas en el desarrollo de este documento.

De forma global, en las fibras se pueden considerar como características principales su relación de aspecto (longitud total respecto al diámetro/espesor), la resistencia a tracción, la forma que poseen y la dosis aplicada (indicadas en unidades de kilogramos de fibra por metro cúbico de mezcla kg/m^3). Estas características son capaces de afectar el comportamiento del hormigón proyectado. En caso de que el comportamiento posterior a la fisura del hormigón sea relevante en el diseño, entonces el criterio principal que se debe especificar es la tenacidad (ICH, 2015).

Es importante considerar a su vez los mecanismos de falla en la fibra para entrelazarlos con las características que las relacionan. Para las fibras de refuerzo podemos apreciar tres mecanismos principales de falla: extracción de fibra, ruptura de fibra y desunión de fibra/matriz (Cifuentes, García, Maeso, & Medina, 2013). En la Figura 2.3 es posible apreciar los 3 mecanismos de falla ya antes mencionados además del efecto puente (fiber-bridging) que producen las fibras en el proceso de fisuración y el caso de falla interna (matriz agrietada) en la matriz de hormigón.

a. Características en base a la relación largo/espesor:

Esta relación busca detener posibles fallas a causa de extracción en donde este tipo de refuerzo no alcanza a anclarse en la matriz y ante la sollicitación de cargas pierde adherencia provocando un desaprovechamiento de la capacidad del refuerzo. A su vez, es necesario ser cuidadoso en que evitar esta falla no conlleve relaciones de aspecto que provoquen un efecto interno de arrastre de aire, que va asociado con un aumento de poros en la matriz (Grzymiski, Musiał, & Trapko, 2019).

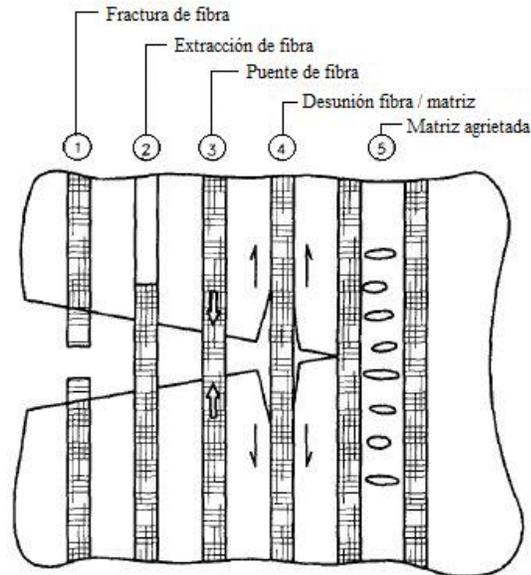


Figura 2.3: Modos de falla de la fibra de refuerzo e internas de la matriz de hormigón.
Fuente: (Zollo, 1996)

b. Características en base a la resistencia a tracción:

Este es un punto relevante, tanto para la configuración tradicional del hormigón armado como para un hormigón reforzado con fibras. En particular, para la fibra significa ser capaz de absorber los esfuerzos de tracción y flexotracción que recibe el hormigón estableciendo la capacidad de fractura en la fibra. El nivel de resistencia al remontarse a la fórmula de esfuerzo queda determinado por su deformación unitaria y el módulo elástico. Al estar la fibra incorporada a una matriz de hormigón va a provocar un vínculo entre el nivel de deformación, expresado en módulo de elasticidad $E = \sigma/\varepsilon$ y la resistencia especificada del hormigón. Este punto se abarca con mayor detalle en la sección 2.2.6.

c. Características en base a la forma:

Para las fibras de polipropileno los productos del mercado muestran poca variedad en las formas, presentando principalmente cambios en el relieve de estas (véase Figura 2.4). Se ha evidenciado que relieves ondulados en fibras de polímeros presentan un mejor desempeño en el hormigón (Hidalgo Yañez, 2017). En las fibras de acero la forma adquiere más importancia con mayores diferencias en su capacidad debido a la geometría, así el presentar en sus extremidades ganchos muestran una mejor adherencia y anclaje con el hormigón, posibilitando un comportamiento de endurecimiento (strain-hardening), no así en el caso de las fibras de polipropileno que presentan un comportamiento comúnmente de reblandecimiento (strain-softening) (Hidalgo Yañez, 2017).



Figura 2.4: Distintas formas y relieves de las fibras de polipropileno. Fuente: (CTES, 2015)

d. Características en base a la dosis de fibra aplicada en el hormigón:

En cada proyecto la dosis requerida se evalúa según los requerimientos geomecánicos y de deformación. De antemano, los fabricantes poseen una brecha de cantidades mínimas y máximas. El límite máximo se aplica debido a estudios con respecto a las dosis que demuestran que un exceso de fibra es capaz de generar bolas o erizos (aglomeración de fibras en zonas específicas no deseada) (Hidalgo Yañez, 2017) y por lo tanto pierde uniformidad, creando zonas débiles de transición interfacial que luego son evidenciadas en fallas internas de la matriz (Qin, Zhang, Chai, Xu, & Li, 2019). Sumado a esto, el exceso de fibra puede aumentar la generación de poros en la matriz. El límite mínimo se establece porque una dosis muy baja no logra homogeneizar la distribución de fibra en el hormigón.

Lo ideal es tener una cantidad que nos asegure la distribución completa de las fibras en toda la mezcla, con esto obtener una tensión uniforme. Respecto al efecto que tiene aumentar la dosis de fibra y la resistencia a compresión asociada, los estudios presentan poca concordancia entre ellos, pero si se apunta a que existe una cantidad en la dosis que al sobrepasarse conlleva una disminución de la resistencia a compresión provocada por la disminución del espacio volumétrico del concreto que es reemplazada por la fibra.

Debido a estos y otros fenómenos es necesario caracterizar y comprender el comportamiento del hormigón con fibra. Al momento de revisar las gráficas típicas de esfuerzo-deformación en el hormigón se aprecian distintas curvas que explican sus comportamientos.

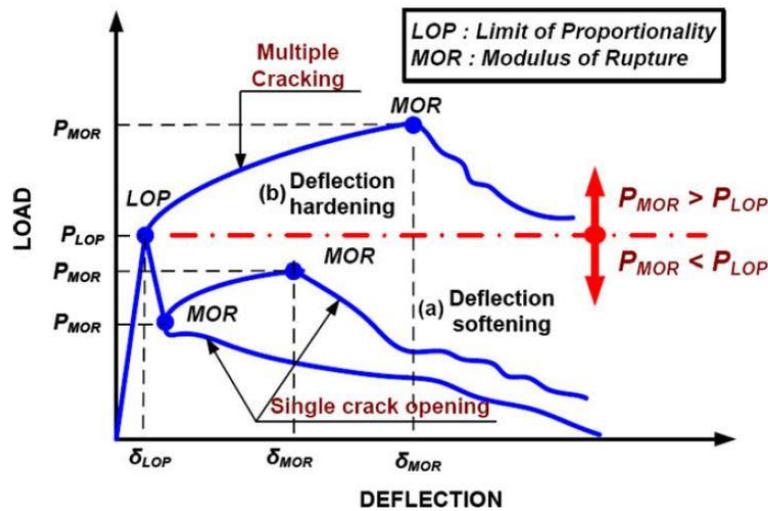


Figura 2.5: Curvas típicas de esfuerzo-deformación de hormigón reforzado con fibra (HRF). Fuente: (Kim, Naaman, & El-Tawil, 2008)

En la Figura 2.5 se muestran distintos comportamientos que puede tener un hormigón reforzado con fibra. El proceso inicial de carga implica una primera fase donde el hormigón llega a su máxima resistencia con baja deformación (δ_{LOP}) y un comportamiento elástico lineal de la curva. Al llegar al primer punto de inflexión se alcanza la fisuración en el hormigón (LOP). El módulo de ruptura (MOR) se define como el momento en donde comienza a ocurrir el ablandamiento de las curvas. Como es apreciable en la Figura 2.5, luego de la fisuración (LOP) es donde se separan los distintos comportamientos que puede tener el hormigón reforzado con fibra.

Como da a conocer Kim, Naaman, & El-Tawil (2008) luego de ocurrida la fisuración se presentan comportamientos de (a) ablandamiento (strain-softening) y (b) endurecimiento (strain-hardening). El primer fenómeno está asociado a que las fibras son extraídas o ya no son capaces de tomar más carga luego de formada la grieta, caracterizándose generalmente por una única grieta. En cambio, cuando ocurre endurecimiento (strain-hardening) las fibras son capaces de tomar mayores niveles de carga y por ende después de formar la primera grieta, ocurre un agrietamiento múltiple y la capacidad de carga se mantiene o incluso aumenta (Nazar, 2016). Este fenómeno se aprecia también en la figura siguiente:

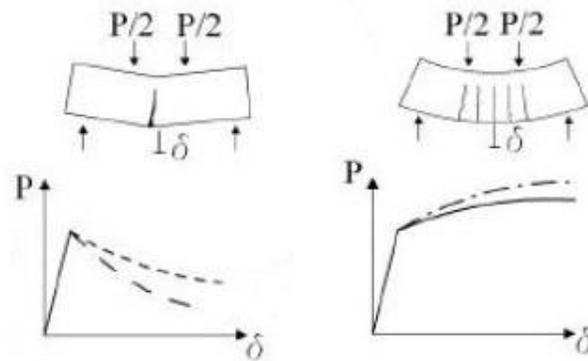


Figura 2.6: Fenómeno de agrietamiento para ablandecimiento y endurecimiento.
Fuente: (Nazar, 2016)

Ahora bien, no sólo se debe tener en consideración el efecto de las fibras en su estado endurecido, es necesario revisar el efecto en su estado fresco considerando que la proyección vía húmeda ha adquirido mayor masificación respecto a la vía seca y particularmente es usada en las faenas mineras del proyecto Chuquicamata Subterráneo. Por tanto, es de interés ver el efecto en la trabajabilidad del hormigón con las fibras de refuerzo.

La docilidad de la mezcla de hormigón se ve afectada ante la presencia de fibra, siendo dicha propiedad una magnitud que se utiliza como un indicador aproximado de la trabajabilidad de la mezcla de hormigón (ICH, 2015). Existe un consenso en que la trabajabilidad se reduce a medida que aumenta el contenido de fibra de polipropileno (Choudhary & Aggarwal, 2016), sin embargo, el superar esta situación sin ver afectada la resistencia significa implementar la adición de aditivos reductores de agua de alto rango (Thirumurugan & Sivakumar, 2013).

Luego, el proceso de curado en el shotcrete es sumamente complicado llevarlo a la práctica ante las condiciones subterráneas que presentan los túneles. La presencia de fuertes corrientes de aire tiene un efecto de secado en la superficie del shotcrete durante las primeras horas de colocada (Putzmeister, 2016), que provoca que el problema de fisuración por retracción deba ser enfrentado con cautela. Al originarse fisuras superficiales, como consecuencia se generan canales para el ingreso de agentes externos que reducen la durabilidad a largo plazo del hormigón (Sadiqul Islam & Das Gupta, 2016), especialmente si tenemos materiales que pueden verse afectados por la corrosión como es el acero.

Aquí la fibra cumple un papel primordial, encontrando reducciones significativas en la generación de fisuras en comparación a un hormigón plano. La inclusión volumétrica entre 0,1%-0,3% muestra una reducción en la retracción plástica de entre 50% a un 99% (Sadiqul Islam & Das Gupta, 2016). A su vez, para contenidos de fibra de 3 kg/m³ o mayores, el agrietamiento vuelve a reducirse

de forma importante ante el efecto de retracción plástica (Mendoza, Aire, & Dávila, 2011), dado que las fibras son capaces de unir las grietas que aparecen en la estructura interna del concreto (Grzymiski et al., 2019).

2.2.2. Desempeño a la compresión del HRF

Al estudiar el comportamiento del hormigón en su estado endurecido, la resistencia a compresión es una propiedad que ha sido estudiada y aprovechada en extensión. Ahora bien, el hormigón de forma independiente es capaz de resistir grandes cargas a compresión, más aún con los desarrollos de hormigones de alta resistencia que parten desde los 35 MPa como lo solicita la norma NCh148.Of68 pero en aspectos nacionales se han superado esas barreras, con aplicaciones como por ejemplo la División El Teniente de CODELCO con usos de 50 MPa para pavimentos de túneles de acceso de frentes y 70 MPa en revestimientos de piso en los frentes de trabajo de túneles (Zabaleta, 1989).

El aporte de la fibra en la resistencia a compresión no tiene un consenso en la actualidad, como ya se mencionó, dado que hay informes que entregan como conclusión que la adición provoca un incremento en la resistencia (Choudhary & Aggarwal, 2016; Abbas, Mtasher, & Ne'ma, 2011), y otros informes entregan resultados de reducción o aporte insignificante en la resistencia a la compresión (Grzymiski et al., 2019; Mendoza et al., 2011). Al tener muchos tipos de fibras sumado a las variables de tipo de cemento, granulometría usada, dosis de aditivos hace difícil converger a una sola conclusión.

Sin embargo, es posible extraer información concluyente. Vemos que existe una brecha de dosis ideal que provoca un beneficio en el hormigón, logrando ser un aporte en su capacidad de compresión. Luego de cierto límite, se crean zonas de transición interfacial en el concreto que podrían afectar la resistencia asociada (Sadiqul Islam & Das Gupta, 2016), creando zonas más débiles en las muestras (Rasul, y otros, 2019) donde el exceso de fibra provoca una perturbación en la matriz que aumenta la porosidad del material (Grzymiski et al., 2019). Ante el hecho probabilístico de disminución a la compresión por la adición de fibra, debe sumarse que el acelerante en la práctica disminuye la resistencia a compresión en torno a un 15% (Nazar, 2016).

2.2.3. Desempeño a la flexión del HRF

En lo que respecta a la flexión, ésta es una propiedad importante cuando se desea evaluar la idoneidad del hormigón para pavimentos, dado que obtener una medición precisa de la resistencia ayuda a minimizar el problema de agrietamiento y riesgo por falla a flexión (Choudhary & Aggarwal, 2016). La inclusión de la fibra en el hormigón logra aumentar la resistencia a flexión (Abbas et al., 2011), sin embargo, existe también evidencias que apunta a que este aumento es de tipo marginal (Singh, 2014).

2.2.4. Desempeño a la tracción/tensión y fisuración del HRFP

En los esfuerzos a tracción/tensión el hormigón sufre una drástica caída de resistencia en comparación con su capacidad de resistencia a compresión. Esto está también reflejado en la aproximación que hace el Comité de Concreto Americano (ACI, por sus siglas en inglés) presente en la ACI318-14 con una aproximación de la tensión de rotura del hormigón de $f_{tr} = 0,62 \cdot \sqrt{f'_c}$, que otorga aproximadamente un 10% de resistencia de tracción en base a su capacidad de compresión (ACI, 2015). Este talón de Aquiles del hormigón conduce a la necesidad de allearlo a un material que otorgue las propiedades de resistencia a la tracción, como es el caso tradicional de las barras de acero. El daño que genera la tracción trae por consecuencia la generación de fisuras.

El daño y avance por fisuración se ve incrementado en el aumento de carga, que obliga a rodear o sobrepasar las partículas que se oponen al avance y es en este momento que el daño se puede ramificar o desarrollar en una única fisura (Hidalgo Yañez, 2017). Las fibras permiten una mejora en la resistencia a tracción a través del efecto de cosido de fisuras que la adición de fibra representa (Cifuentes & Medina, 2007) (véase Figura 2.7). Para distintas dosis de fibras se llega a un aumento máximo de 40% en comparación con mezclas sin fibras (Choudhary & Aggarwal, 2016) y una reducción significativa del ancho de grietas de 72-93% (Sadiqul Islam & Das Gupta, 2016).

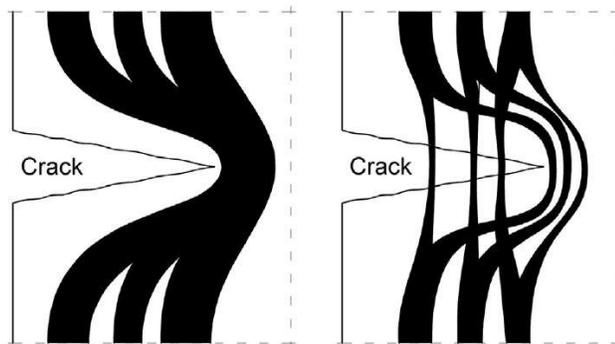


Figura 2.7: Esquema de esfuerzos con y sin fibra. Fuente: (Grzymiskiet al., 2019)

Continuando con aspectos relacionados a la fisuración, la mecánica de fractura nos da el entendimiento al porqué cuando queremos caracterizar la oposición del hormigón a fisurarse se mide a través de la energía y no de esfuerzos como en otras propiedades. Para contextualizar, la mecánica de fractura estudia la formación y propagación de la fisura y la relación que hay con el material (Segura, 2013). En los materiales existen tres tipos idealizados: frágil, dúctil y cuasi frágil, considerando al hormigón cómo este último (véase la Figura 2.8).

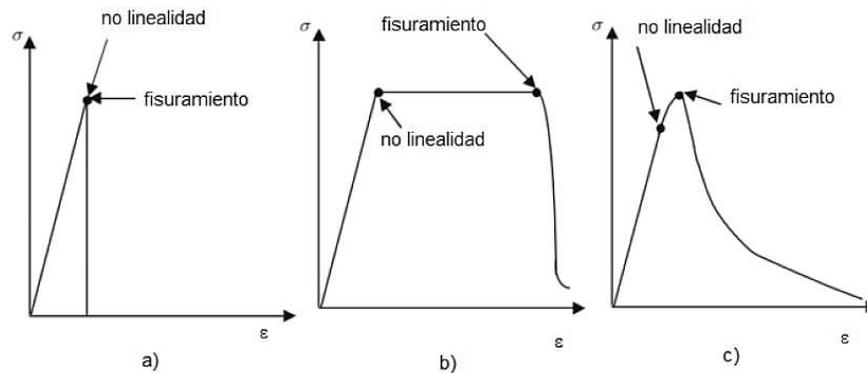


Figura 2.8: Curva esfuerzo deformación de modelo (a) frágil, (b) dúctil y (c) cuasi frágil.
Fuente: (Segura, 2013)

La dificultad al querer conocer el esfuerzo en el punto de fisuración en modelos de un medio frágil radica en que estos esfuerzos convergen a infinito, teniendo la misma dificultad en medios cuasi frágiles (como es el caso del hormigón). Sin embargo, al profundizar en el proceso de fractura, el principio de energía liberada basada en la 1ra ley de la termodinámica, nos dice: "se puede formar una fisura (o una fisura existente crecer) solamente si el proceso origina una disminución de la energía total o esta permanece constante" (Segura, 2013, pág. 7). Por esta razón nos interesa la capacidad de absorción de energía del material y registrar su tenacidad, que viene a ser la capacidad de absorber energía después del primer agrietamiento del hormigón.

2.2.5. Desempeño a la tenacidad (absorción de energía) e impacto del HRFP

Entendemos la tenacidad como "una medida de la resistencia del hormigón después de la fisuración en el hormigón proyectado reforzado con fibra. Es una propiedad relevante cuando se espera que la estructura esté sometida a deformaciones o desplazamiento importantes después del agrietamiento" (ICH, 2015, pág. 31). Existe un claro consenso que a través de la adición de las fibras de polipropileno se logra de forma importante un incremento en la tenacidad del hormigón, reconociendo la elevada capacidad de absorción de energía aportada como una principal ventaja (Cifuentes et al., 2013; Gettu & Gopalaratnam, 1995; Mendoza et al., 2011), además de ver beneficiada su resistencia al impacto (Gettu & Gopalaratnam, 1995), llegando a valores incluso mayores al doble de la capacidad de impacto sin fibra para campañas experimentales con dosis de 5 kg/m^3 (Mendoza et al., 2011).

Al entregar una mayor resistencia a los efectos dinámicos (impacto) le permite al hormigón reforzado con fibra (HRFP) entregar una gran cualidad a elementos que están expuesto a cargas altas en tiempos cortos, como son las explosiones (Mendoza, Vásquez, & Villa, 2012), suceso re-

corriente en las faenas mineras. A esto agregar el hecho de que el hormigón en presencia de cementos puzolánicos evidencia una mayor resistencia al impacto, siendo favorable la presencia de ambos componentes (Alhozaimy, Mirza, & Soroushian, 1996).

2.2.6. Influencia del módulo de elasticidad y las deformaciones del HRF

Mediante los estudios realizados de hormigones con fibra se ha visto reflejado que el módulo de elasticidad está dentro de los parámetros más influyentes en el comportamiento de fractura del hormigón (Karihaloo, 1995). La fibra al impedir el agrietamiento por contracción del hormigón implica un efecto pronunciado en el módulo elástico, obteniendo una mayor rigidez (Cifuentes et al., 2013). Se ha visto que en hormigones de alta resistencia el comportamiento es más frágil (Moreira de Alencar, Reis, & Silva, 2018; Zollo, 1996) y las fibras a su vez entregan mayor ductilidad, por ende, ambas deben ir relacionado con las propiedades en conjunto del hormigón y la fibra.

Como lo indica Cifuentes (2013), una fibra en la que prepondera su ductilidad en favor de su resistencia a tracción se comporta de mejor forma en hormigones de menor calidad en contraste a un hormigón de alta resistencia, pues la ductilidad ofrecida permite a la fibra deformarse más, aplicando un correcto efecto puente con un desarrollo y aprovechamiento óptimo de su capacidad. En el caso de tener una fibra que posee una alta resistencia a la tracción con un alto módulo de rigidez, ocurre que las fibras fallan mayormente por extracción (en el caso de ir mezclado con hormigones que no sean de alta resistencia), no alcanzando su máxima resistencia a tracción.

Esto también se puede apreciar mediante el ejemplo del comportamiento de 2 muestras de hormigón reforzado con fibra, que actúan para un esfuerzo “ σ ” igual en ambas probetas. Por lo tanto:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma \rightarrow E_1 \cdot \epsilon_1 = E_2 \cdot \epsilon_2 \text{ (por ley constitutiva)}$$

Comparando una muestra de hormigón de alta resistencia con un hormigón corriente tenemos que:

$$E_1 > E_2 \Rightarrow \epsilon_1 < \epsilon_2$$

La deformación para un mismo esfuerzo es diferente para cada muestra y es esta diferencia en la deformación lo planteado por Cifuentes (2013), que afecta directamente en la fibra y el mecanismo de falla asociado. Podemos tener dos situaciones en que ocurra esta diferencia, muestras con distinto módulo de Elasticidad (E) en donde se usa el mismo tipo de fibra, pero con diferentes dosis, o muestras que tienen diferentes E porque son distintas las características de la fibra a pesar de tener la misma dosis en la mezcla.

2.2.7. Desempeño comparativo entre fibra de acero y de polipropileno

No se puede desconocer y obviar la existencia de las fibras de acero, las que tienen beneficios y carencias. A continuación, se presenta la Tabla 2.2 que entrega información referente a puntos comparativos entre el desempeño operacional y el comportamiento mecánico entre ellas.

Tabla 2.2: Desempeño comparativo entre fibras de polipropileno y acero

Polipropileno	Acero
Mecanismo de falla de la fibra	
Presenta un mecanismo de falla menos abrupto comparado a las fibras de acero, debido a su condición más elástica (Nazar, 2016).	Presenta un mecanismo de falla en que las fibras deslizan o sufren un corte abrupto (Nazar, 2016).
Capacidades resistentes de la fibra	
La capacidad de resistencia a tracción del HRFP muestra un muy buen comportamiento, siendo levemente inferior a la de acero, basado en la comparación entre fibra Barchip48 y fibra Dramix 3d 65/35BG (Nazar, 2016).	Al comparar las resistencias a compresión, existe un ligero aumento en la capacidad en favor al acero (Grzymski et al., 2019).
	La capacidad de carga o también llamado módulo de ruptura (MOR) es más alta en comparación con fibras sintéticas (Kim et al., 2008; Moreira de Alencar et al., 2018).
	Ante cargas mayores, en donde las solicitudes son grandes y constantes (por ejemplo: pisos industriales) la fibra de acero tiene un mejor comportamiento (Mendoza et al., 2012).
Proyección del shotcrete con fibra	
Provoca menores problemas en las bombas (taponamiento de pitón), además de provocar menor desgaste en boquillas y mangueras (Cengiz & Turanli, 2004).	Estas fibras pueden provocar la formación de bolas de fibras (erizos) que producen bloqueos en las mangueras. Además, se restringe la longitud de la fibra de acero a no más del 70% del diámetro interno de la manguera (ICH, 2015).
Existe una reducción en pérdidas de shotcrete por concepto de rebote en la proyección, obteniendo un mayor rendimiento y por ende convirtiéndose en un atractivo económico (Cengiz & Turanli, 2004).	
Efecto de corrosión en la fibra	
No se presentan problemas de corrosión por la naturaleza de su composición (Nazar, 2016).	Pérdida significativa de capacidad residual, efecto atribuido al fenómeno de corrosión (Nazar, 2016).

Fuente: Elaboración propia en base a (Cengiz & Turanli, 2004), (Grzymski et al., 2019), (Kim et al., 2008; Moreira de Alencar et al., 2018), (Mendoza et al., 2012) y (Nazar, 2016).

En forma adicional a la información de la Tabla 2.2, se encuentra que el aporte de las fibras de acero y polipropileno en capacidad y ductilidad a flexión aún otorgan un aporte bajo de resistencia (desde el punto de vista estructural) en comparación con el marco reticulado que se usa en refuerzo de túneles que poseen deformaciones importantes (Nazar, 2016), sin embargo, se encuentra que las fibras de acero tienen un mejor comportamiento en cargas mayores (Mendoza et al., 2012).

A si mismo Nazar (2016) plantea con respecto al reemplazo de mallas electrosoldadas de acero (AT56-50H), la existencia de investigaciones prometedoras ante el uso de fibra como sustituto, encontrándose capacidades seccionales aproximadamente igual, con similares indicadores de ductilidad y degradación en las fibras de acero. Para el caso de las fibras de polipropilenos las capacidades seccionales presentan un 15-20% mayores a la malla, con una ductilidad menor pero una mayor distribución del daño. A pesar de que se usa una en el rango recomendada de 6 kg/m³ en fibra (Barchip48), el autor aconseja la realización de más ensayos, por lo tanto, es prometedor, pero no concluyente.

2.2.8. Beneficios de las fibras de polipropileno en el hormigón proyectado

Para englobar los beneficios entregados de parte de las fibras de polipropileno en el uso del hormigón proyectado, se destaca en la industria la reducción en los tiempos de trabajo (transporte, logística, almacenamiento, aplicación, etc.), teniendo un menor costo en comparación con las fibras de acero (Alani & Beckett, 2013), distinguiéndose por ser resistente a la corrosión, a los álcalis y ácidos en ambientes agresivos (Construcción Minera, 2018). A su vez, es capaz de reemplazar el uso de mallas electrosoldadas bajo ciertas condiciones geológicas (especialmente en roca), limitadas en su función de sostenimiento estructural en suelos con zonas de grandes deformaciones.

Las fibras en vista de lo expuesto en esta sección producen en el hormigón una considerable mejora en su capacidad de deformación, tenacidad, el control de grietas y resistencia a los efectos dinámicos (impacto) (Mendoza et al., 2012). Se destaca adicionalmente la reducción del efecto de desprendimiento en hormigones de alta resistencia con fibras que quedan sometidos a altas temperaturas (Cifuentes et al., 2013). Los beneficios mencionados son apreciados especialmente en estructuras como pisos, pavimentos, recubrimientos de taludes y túneles (Mendoza et al., 2012).

La ventaja adicional de resistencia a los efectos dinámicos (impacto) que posee el hormigón reforzado con fibra es una gran cualidad para elementos que están expuesto a cargas altas en tiempos cortos como explosiones (Mendoza et al., 2012), suceso muy recurrente en las faenas mineras que repercute en la masificación de su uso en esta industria.

2.3. Proceso de recuperación de la fibra de polipropileno

Se presenta al inicio de este subcapítulo el diagrama de flujo del actual proceso de recuperación de la fibra de polipropileno que se realiza en la división de Chuquicamata para PMCHS.

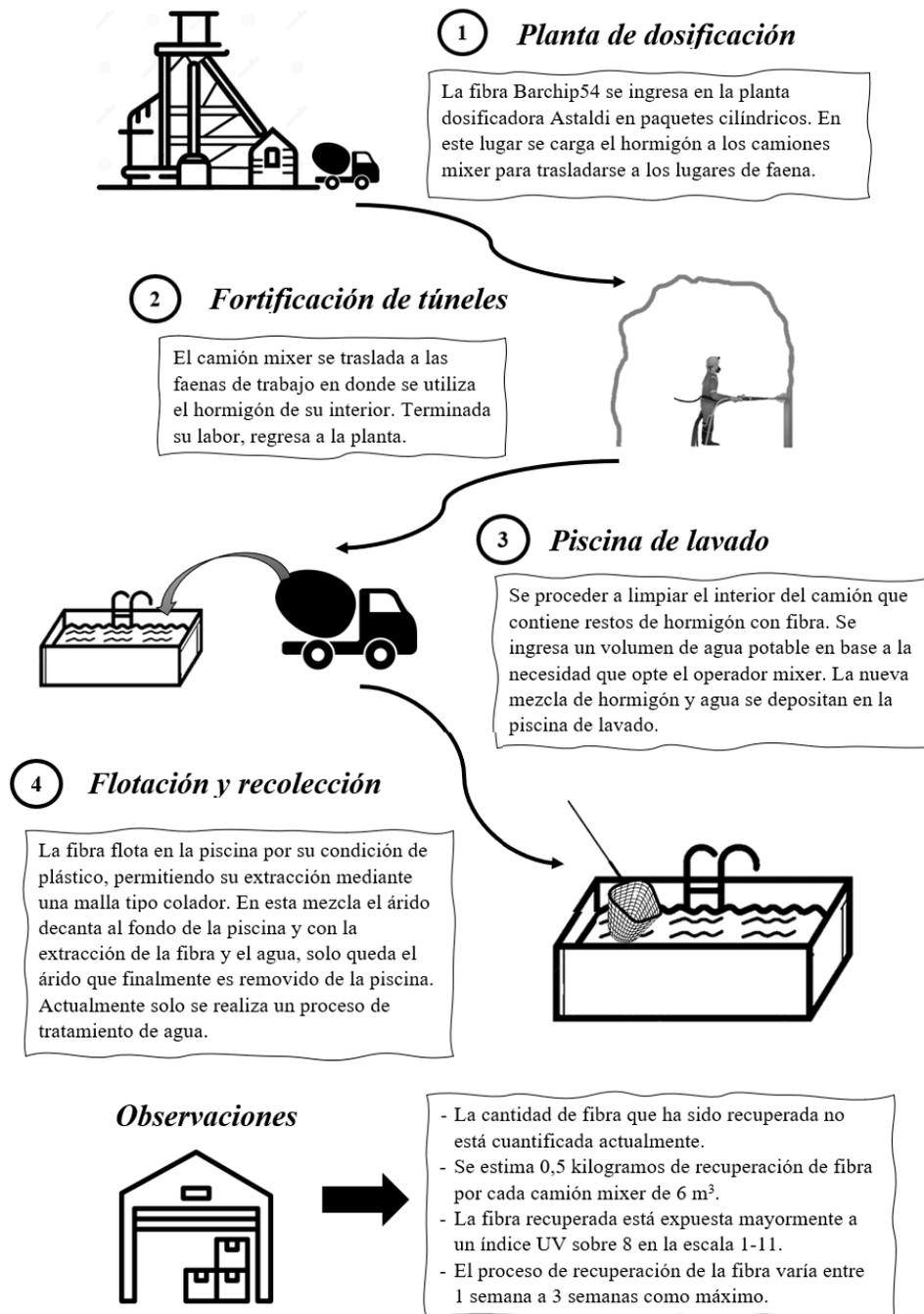


Figura 2.9: Diagrama de flujo de proceso de recuperación de fibra de polipropileno.
Fuente: (Elaboración propia)

La importancia de conocer el flujo completo por el que pasa la fibra de polipropileno para ser recuperada recae en identificar los agentes externos que participan indirectamente en la condición de la fibra y establecer cuales pueden estar siendo influyentes.

Este diagrama se construye a partir de la forma actual en que se recupera la fibra en la división de Chuquicamata a partir de información entregada por personal de CODELCO y complementada con imágenes de la planta dosificadora y piscinas de lavado tanto llena, vacía con el material depositado de la decantación del árido (véase Anexo 8.7).

2.4. Normas y guías

En este capítulo se establecen las normas requeridas y guías para confeccionar, estudiar y establecer parámetros que permitan estudiar la validación de la reutilización de las fibras.

2.4.1. Docilidad: Determinación según NCh1019 - Antecedentes de guía chilena del shotcrete

Se pretende medir la trabajabilidad que posee el hormigón mediante el método del asentamiento del cono de Abrams usado en la norma NCh1019 que permite obtener la docilidad tanto en terreno como en laboratorio. Como se indica en la guía chilena de hormigón proyectado, la docilidad es una magnitud que en la práctica normal del hormigón se utiliza como un indicador aproximado de la trabajabilidad.

El método se resume en una muestra de hormigón fresco colocado y compactado en un molde (cono de Abrams) normado que posee una forma de cono trucado. El molde se levanta dejando que el hormigón se asiente. Se mide y registra el asentamiento del hormigón como la distancia vertical entre la altura original y la posición final del centro de la superficie del hormigón. Para el ensayo es necesario usar una cantidad aproximada de 10 litros de hormigón, la cual es desechada luego de finalizada la prueba.

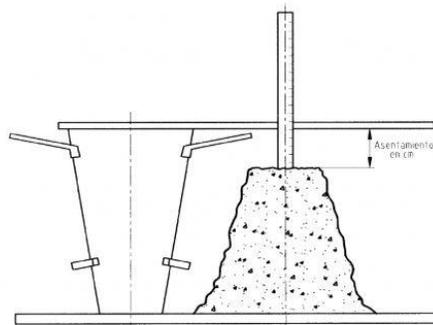


Figura A.2 - Medida del asentamiento

Figura 2.10: Medida de asentamiento. Fuente: (NCh1019)

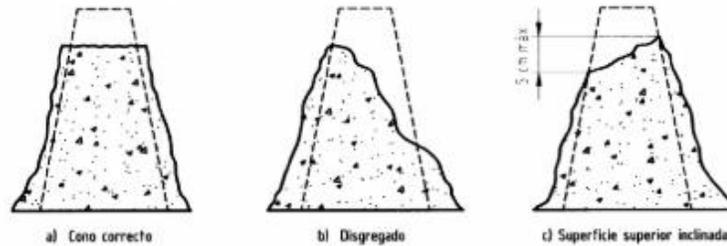


Figura 2.11: Formas de asentamiento. Fuente: (NCh1019)

En general, las mezclas de asentamiento más bajas (60-100 mm) son más adecuadas para las aplicaciones en las que no se utilizan aditivos acelerantes de fraguado y las mezclas con asentamientos mayores (180-220mm) son más adecuados para aplicaciones en las que si se utiliza un acelerador de fraguado. En caso de utilizar acelerador de fraguado, el asentamiento debe ser optimizado (ICH, 2015). Respecto a la consistencia del hormigón, esta se determina con el ensayo de Mesa de sacudida bajo el estándar UNE EN12350-5 que para las pruebas de hormigón fresco de este trabajo de no se realiza, siendo controlado solo por medio del Cono de Abrams.

2.4.2. Resistencia a la compresión: Determinación según NCh1037 - Antecedentes de guía chilena del shotcrete

Definimos la resistencia a compresión como la resistencia de un material a una fuerza de aplastamiento aplicada axialmente (ICH, 2015). Su determinación se basa en que para el hormigón proyectado simple esta prueba es la principal propiedad a la que se especifica ($f'c$).

La prueba se realiza en base a la norma chilena NCh1037: Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas estableciendo en esta norma el método de ensayo. La confección de las probetas se hace en base a la norma mencionada, y para esta investigación se usan probetas cilíndricas con dimensiones de 150 mm de diámetro y altura 300 mm.

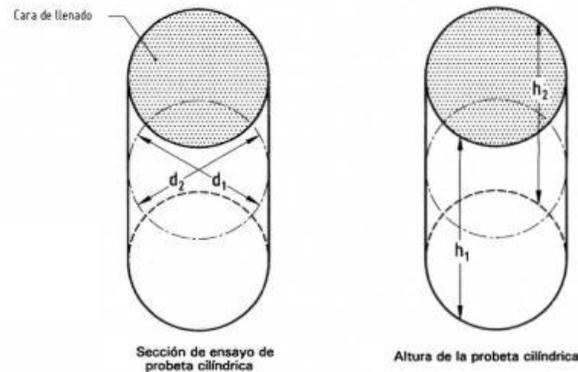


Figura 2.12: Sección y altura de ensayo de probeta cilíndrica. Fuente: (NCh1037)

La prueba es realizada para un hormigón endurecido, en la que la mezcla puede verse afectada por variables externas durante el proceso de colocación como temperatura, acelerante de fraguado, proyección o compactación deficiente o un curado inadecuado (ICH, 2015).

Es importante diferenciar el hormigón moldeado del proyectado y como se determina su resistencia a compresión. El hormigón moldeado nunca debe proyectarse directamente en moldes cilíndricos, siendo contraindicado/contraproducente a causa del rebote que se produce, no así en el panel de prueba que es considerado un sustituto adecuado en el cual se pueden tomar testigos perforados. La medición en moldes cilíndricos se mide mejor rellenando dichas probetas con hormigón obtenido directamente desde un punto de descarga (ICH, 2015).

Comparando la resistencia de compresión entre ambos métodos (testigos y moldeado), se tolera generalmente una variación del 20% entre ellos considerando que el testigo extraído posee un valor menor. La diferencia en la resistencia será menor en caso de que no se use acelerante (ICH, 2015).

Cuando realizamos la dosificación, tenemos una relación agua/cemento que está altamente relacionado con la resistencia a compresión que obtenemos. Para hormigón proyectado por vía húmeda la relación oscila entre 0,4 para aplicaciones civiles y subterráneas, mientras que en piscinas los valores pueden llegar a 0,65. Las bajas relaciones de A/C se pueden obtener gracias al uso de reductores de agua de alto rango que hay actualmente (ICH, 2015).

A continuación, se presenta la Tabla 2.3, que entrega la especificación de la resistencia mínima esperada en diversos proyectos de infraestructura que parten de los 30 MPa a los 28 días de prueba en cilindros:

Tabla 2.3: Resistencias recomendadas por aplicación (medidas en cilindros a 28 días)

Aplicación	Rango de resistencia (MPa)
Piscinas	25-30
Subterráneos y bodegas	30-40
Revestimiento de túneles	30-50

Fuente: (ICH, 2015)

Finalmente, se replican las dosificaciones de obra en laboratorio para realizar ensayos en moldes cilíndricos en base al llenado en un punto de descarga, buscando mantener las mismas condiciones de los materiales en obra.

2.4.3. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción según EN 83515:2010

La determinación de las propiedades viene bajo la norma europea EN 83515 para hormigones reforzados con fibras. Este es un ensayo de doble punzonamiento, propuesto por el académico Wai Fah Chen en 1970, consistente en someter a compresión uniaxial a un cilindro mediante dos placas de carga cilíndricas de acero de diámetro menor (37,5 mm de diámetro de la placa de carga menor), dispuestas concéntricamente por encima y debajo de la probeta (Carmona, Aguado de Cea, Molins, & Cabrera, 2009) (véase Figura 2.13).

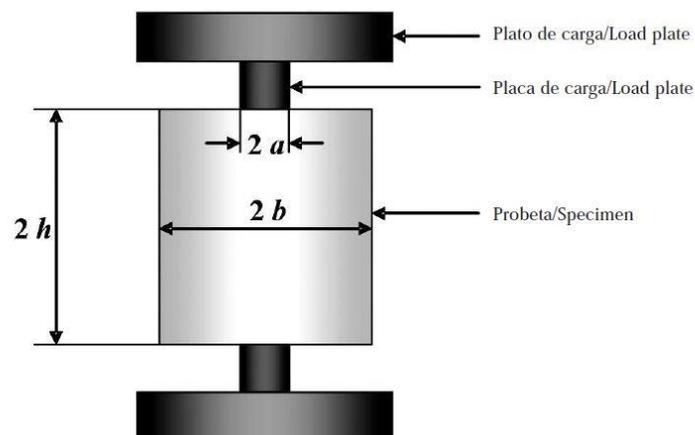


Figura 2.13: Dimensiones de probeta para método Barcelona.

Fuente: (Carmona et al., 2009)

La presión ejercida por esta placa de carga forma una zona cónica de compresiones, provocando un incremento del diámetro del cilindro, por ende, se originan esfuerzos de tracción perpendiculares a las líneas radiales. Al sobrepasar el estado tensional de la resistencia del hormigón, ocurre la

generación de grietas, las cuales toman la forma de Figura 2.14, mostrando los planos de fisuración típicos (Carmona et al., 2009).

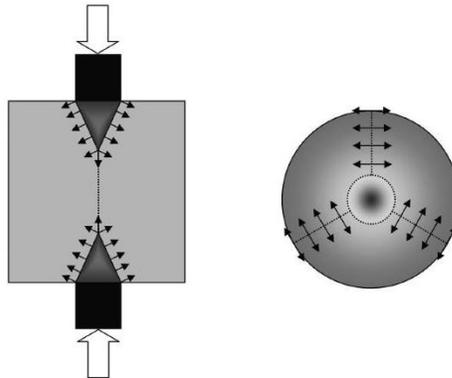


Figura 2.14: Esquema representativo de zona cónica de esfuerzos y plano de fisuración.
Fuente: (Carmona et al., 2009)

El ensayo se realiza por control de desplazamiento a una velocidad de 0,5 mm/seg como lo especifica la norma. Se obtiene la curva carga versus abertura circunferencial mediante un extensómetro circunferencial ubicado en la altura media del cilindro. La absorción de energía se registra para las aberturas circunferenciales de 2; 2,5; 4 y 6 milímetros y la carga unitaria de fisuración f_{ct} se calcula según:

$$f_{ct} = \frac{4 \cdot P_f}{9 \cdot \pi \cdot a \cdot H}$$

Donde P_f es la carga que produce la fisuración (en N), a es el diámetro del disco de aplicación de la carga (en mm) y H es la altura de la probeta (en mm).



Figura 2.15: Dimensiones de la probeta y punzón, cadena extensométrica y plano de falla.
Fuente: (Aire, 2018).

El método Barcelona (EN 83515:2010), como es llamado, logra determinar la resistencia a la fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Sin embargo, este método no es el único.

Para determinar la tenacidad ya existían diversas normas como se aprecia en el diagrama de la Figura 2.16.

La elección de la norma EN83515 para ensayar las probetas de esta investigación recaen en los beneficios que otorga. El primer beneficio recae en el bajo coeficiente de variación que poseen sus resultados, siendo respaldado por diversos autores, encontrando una variabilidad que oscila entre el 13%, 6-8% e inferior a un 15% para Carmona et al. (2009), Aire (2016) y Espinoza (2017) respectivamente. No así en los ensayos que están asociados a vigas, los cuales llegan a presentar coeficientes de variación cercanas al 20-30% (Carmona et al., 2009), llegando incluso a 40% (Hidalgo Yañez, 2017).

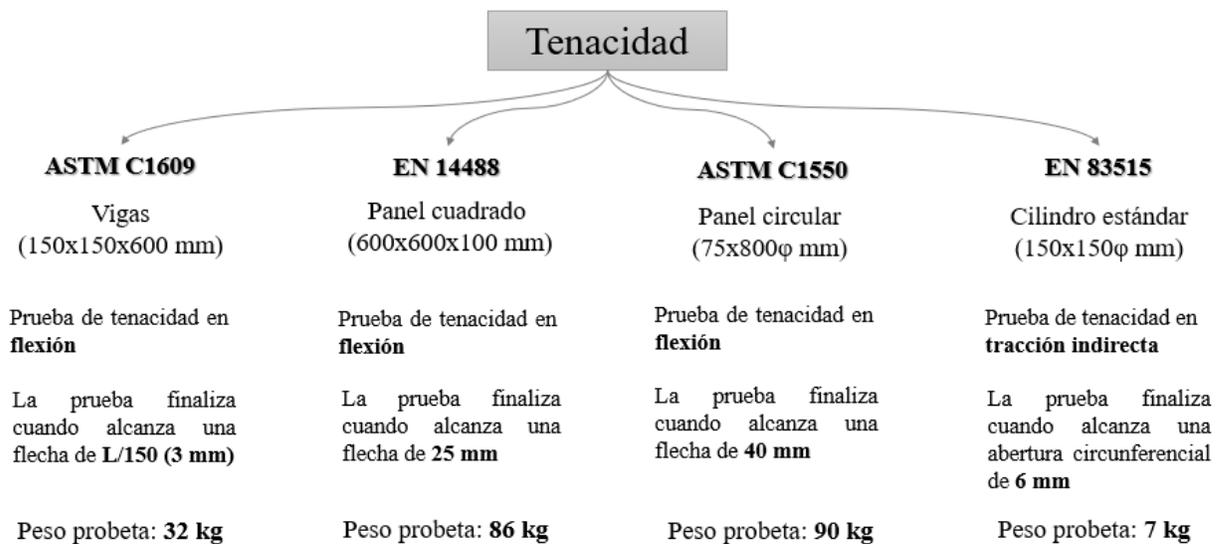


Figura 2.16: Esquema de pruebas de control de tenacidad. Fuente: Elaboración propia en base a Aire (2016).

Los ensayos de panel tanto cuadrados (EN14488-5) como circular (ASTM C1550) también poseen una baja variabilidad (7-10% de variabilidad) para las muestras de tenacidad (ICH, 2015), pero el método Barcelona al ser probetas de solo 7 kg implican un mayor ahorro de hormigón (Carmona et al., 2009), un menor costo de ejecución (Carmona & Espinoza, 2017) y mayor facilidad de transporte.

Por último, Carmona & Espinoza (2017) plantean una buena correlación no lineal entre el ensayo Barcelona y el ensayo de panel EFNARC, en los cuales se usaron fibras de polipropileno Barchip54 para distintas dosificaciones (4, 8 y 12 kg/m³), aditivo Plastocrete y aditivo Viscocrete al igual que la campaña experimental de esta investigación. En ella se establece una función potencial con coeficiente de determinación $r^2=0,997$:

$$E_{(EFNARC,25mm)} = \frac{383,045}{\alpha} \cdot E_{(BCN,6mm)}^{0,211}$$

$$\text{Donde } \alpha = \begin{cases} 1,28 \text{ contenido de fibra} = 4 \text{ kg/m}^3 \\ 1 \text{ contenido de fibra} = 8 \text{ kg/m}^3 \\ 1 \text{ contenido de fibra} = 12 \text{ kg/m}^3 \end{cases}$$

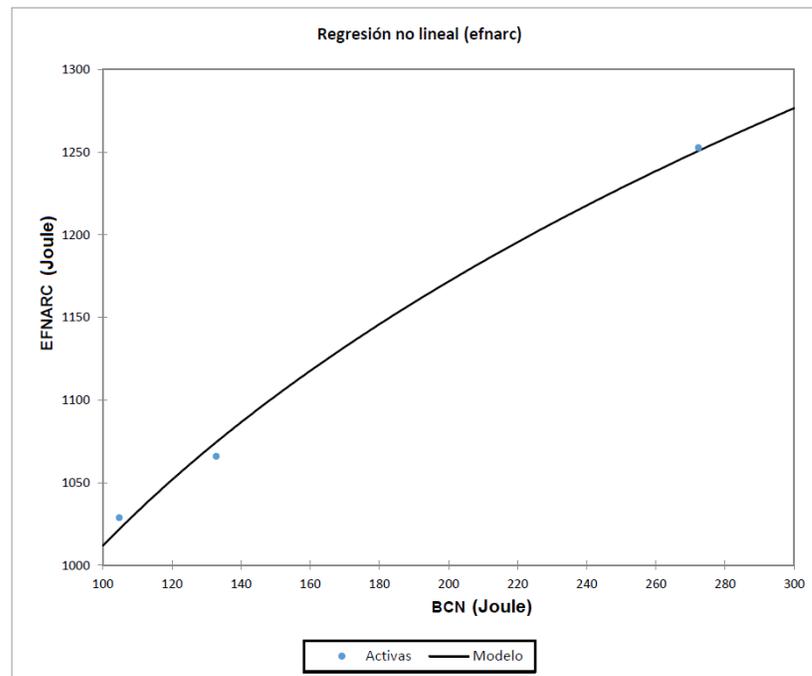


Figura 2.17: Correlación no lineal entre ensayo EFNARC y Barcelona en fibra Barchip54.
Fuente: (Carmona & Espinoza, 2017)

2.4.4. Bases de requisitos de control de calidad para shotcrete de fortificación de CODELCO

El presente documento son las bases internas del Sistema de gestión de proyectos en CODELCO para examinar los requisitos de control de calidad para shotcrete de fortificación. Se utiliza para esta investigación con la intención de comparar los resultados obtenidos con los requerimientos internos que tiene CODELCO. De esta forma establecer puntos de validez en los datos encontrados con los propios criterios de CODELCO.

En dicho documento encontramos controles y propiedades del hormigón proyectado. Se extrae la información y requerimientos de trabajabilidad, resistencia a compresión y tenacidad como medida de absorción de energía, además de la medición de la temperatura ambiente al igual que del shotcrete.

La medida de trabajabilidad la entregan los indicadores de docilidad y/o consistencia, las cuales deben cumplir con lo siguiente:

Medición de la Trabajabilidad	Métodos	Parámetro de medición	Requisito (EFNARC)
Docilidad	NCh 1019 ASTM C143	Asentamiento (Descenso en cm)	18 a 22 cm.
Consistencia o Flujo	EN 12350-5 (Mesa de Sacudidas)	Escurrimiento (Diámetro en cm)	50 a 55 cm.

Figura 2.18: Métodos de medición de trabajabilidad. Fuente: (CODELCO, 2019)

Además, se dan los rangos de medición de temperatura necesaria en el ambiente y el shotcrete:

Temperatura Ambiente	ASTM C1064	Temperatura (°C)	(EFNARC/NCh170) 5°C a 30°C
Temperatura del Shotcrete	ASTM C1064	Temperatura (°C)	(EFNARC) 15°C a 30°C, ideal 20°C

Figura 2.19: Requisitos de temperatura ambiente y del shotcrete. Fuente: (CODELCO, 2019)

Con relación a la medición de la resistencia a compresión, el documento especifica 3 metodologías, que consisten en la resistencia inicial (aguja de penetración de 3 mm), la resistencia temprana (hincado de clavos) y la resistencia final (mediante testigos). Resistencia final se define como la medida máxima de la resistencia a carga axial de testigos de hormigón, se expresa en kilogramos fuerza por centímetro cuadrado (kgf/cm^2) y/o en Mega pascales (MPa), a una edad de 28 días ($1 \text{ MPa} = 10,2 \text{ kgf/cm}^2$). La resistencia especificada será la medida en testigos de esbeltez de 1 a 2, y sólo se aplicará factor de corrección por esbeltez, expresando la resistencia con esbeltez 2.

Compresión de testigos de hormigón	NCh1171/1	Resistencia a la compresión a 28 días, resistencia directa expresada con esbeltez 2 (MPa) (Kgf/cm ²)	Ningún resultado de resistencia (promedio de 3 testigos) puede ser inferior al 85% de la resistencia especificada.
------------------------------------	-----------	---	--

Figura 2.20: Parámetros de medición y requisitos para resistencia final a compresión. Fuente: (CODELCO, 2019)

Además, se especifica que ningún valor individual de testigos debe encontrarse bajo el 75% del valor de la clase de resistencia.

En las bases de control de calidad de CODELCO se mide la tenacidad por medio de los ensayos de viga o panel, obteniendo su valor en términos de carga residual o capacidad de absorción de energía. Este valor se determina como el área bajo la curva de carga/deformación en unidad de Joule. Los métodos se entregan a continuación:

Absorción de Energía	Métodos	Parámetro de medición	Requisito
Panel cuadrado 600x600 mm, espesor 100 mm.	EN 14488-5	3 paneles a 28 días, apoyo en los 4 bordes, carga central, deflexión de 25 mm. central Absorción de energía (Joule)	Tabla 14
Panel circular diámetro 800 mm, espesor 75 mm.	ASTM C1550	3 paneles a 28 días, apoyo en 3 puntos, carga central, deflexión de 40 mm. central Absorción de energía (Joule)	Tabla 15

Figura 2.21: Métodos de obtención de absorción de energía. Fuente: (CODELCO, 2019)

También se presenta los requisitos de absorción de energía para el panel cuadrado EFNARC EN14488-5 (véase Figura 2.22).

(ÖBV, 2013)	Rango de Absorción de Energía en Joule (Deflexión de 25 mm)
Aplicación / Función	
Shotcrete de sello o de estabilización	500 – 700 J
Capa primaria en roca dura, con baja deformación	700 – 1000 J
Capa primaria roca dura, alta deformación	800 – 1200 J

Figura 2.22: Requisitos de absorción de energía – Panel cuadrado EFNARC EN 14488-5. Fuente: (CODELCO, 2019)

Un punto importante es la nota colocada en el subcapítulo de tenacidad, que menciona que pueden existir métodos alternativos de medición de tenacidad, mencionando explícitamente el método Barcelona, UNE-EN 83515. Además, permite la correlación de este ensayo con otro solo si está correctamente implementado.

2.5. Especificaciones técnicas de materiales del experimento

El subcapítulo actual busca entregar las especificaciones técnicas relevantes de cada material usado en la elaboración de las probetas de ensayo. El agua utilizada es agua potable proveniente de las plantas de alcantarillado Essbio presentes en la comuna de Chimbarongo. Como se busca

replicar en laboratorio el hormigón usado en faenas de Chuquicamata subterráneo, es importante enlazar la misma procedencia de los materiales y en caso de usar otro, esclarecer este dato con el fin de detallar el material diferente buscando minimizar el efecto de cambio.

2.5.1. Fibra de polipropileno Barchip54

La recuperación de las fibras de polipropileno en estudio proviene de las faenas de la mina subterránea de Chuquicamata, por lo tanto, se conserva la marca y el tipo de fibra usada para hacer el estudio de esta investigación, incluyendo el uso de la fibra nueva en las probetas. La fibra corresponde a una fibra estructural que ofrece Elasto Plastic Concrete, llamada Barchip54. Sin embargo, Barchip tiene en sus productos una gama más amplia de tipos de fibra.

Las fibras Barchip están certificadas por la norma europea CE bajos los requerimientos de desempeño de la norma EN 14889 y por la norma ASTM C1116 – tipo III.

A continuación, se presentan las características y propiedades de este tipo de fibra:

Tabla 2.4: Propiedades de Fibra Barchip54

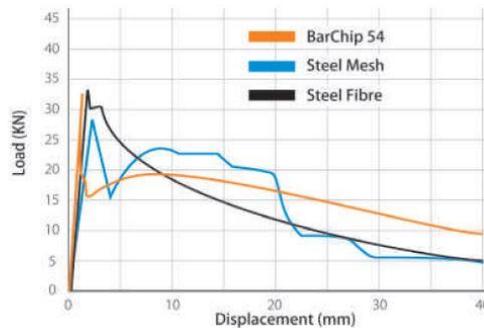
Resina	Olefina modificada
Largo	54 mm
Resistencia a la tracción	6400 kg/cm ²
Superficie	Relieve continuo
Densidad relativa	0,90 - 0,92
Módulo de Elasticidad	10 GPa
Punto de fusión	159 - 179 °C

Fuente: Ficha técnica Barchip 54 (Anexo 8.2)

Con respecto a la dosis usada, para condiciones geotécnicas normales la dosis típica es entre 3 y 6 kg/m³ (para el caso estudio la dosis es de 5 kg/m³, encontrándose en este rango). Para lograr una mezcla homogénea entre las fibras y el hormigón, depende mucho de la eficiencia del huevo y generalmente este debería seguir girando por un mínimo de cinco minutos para lograr una unión exitosa (Anexo 8.2 Ficha técnica Barchip54).

Dentro de las características mostradas se indica que la olefina es resistente a la luz solar UV. Además, la ficha técnica indica que la fibra es apta para caminos, veredas, prefabricados, shotcrete, pisos industriales, radieres, muros, viviendas.

Por último, se da a conocer resultados comparativos del ensayo panel circular según ASTM C1550 con respecto a malla de acero (Steel mesh) y fibras de acero (Steel fibre) en la Figura 2.23.



Refuerzo	Dosis (kg/m ³)	ASTM C-1550 (Joules)	EFNARC (Joules)
Barchip54	5,0	470	1175
Malla F41		475	1187
Fibra Metálica	30	444	1110

(Resultado promedio con cinco paneles circulares)

Figura 2.23: Comparación de resultados en fibra sintética, metálica y malla de acero.
Fuente: Hoja técnica de Barchip54 - Anexo 8.2

2.5.2. Cemento Melón Extra

El cemento utilizado en la confección de las probetas de ensayo es un cemento Melón Extra de alta resistencia, no obstante, en las obras de la Mina Chuquicamata subterránea se utiliza el cemento Polpaico P400. Por consiguiente, para ser rigurosos y no perder representatividad en la muestra se dan a conocer las características de ambos. Es importante mencionar que ambos cementos tienen la misma clasificación según norma NCh148.Of68. En este marco de clasificación mencionado, ambos son grado alta resistencia, formulado en base a clínquer, yeso y materiales puzolánicos, teniendo cada uno sus propias dosificaciones que concluyen en las características distintivas de cada cemento.

Las características mecánicas y de fraguado de ambos cementos se presentan en la Tabla 2.5:

Tabla 2.5: Tabla comparativa de cemento usado en probetas y en obra

Características	Cemento Melón extra	Cemento Polpaico P400
Fraguado inicial (min)	90	100
Fraguado final (min)	125	270
Resistencia a la compresión (MPa)		
7 días	420	323
28 días	500	449
Resistencia a la flexotracción (MPa)		
7 días	65	48
28 días	75	63

Fuente: Anexo 8.3

2.5.3. Áridos Cachapoal

Los áridos que se usan para confeccionar las probetas provienen de la provincia del Cachapoal, siendo la procedencia diferente a la usada en obra. Sin embargo, se mantiene la granulometría de los áridos usada en las faenas de túneles de Chuquicamata para hormigón proyectado. Por tanto, el tamaño de árido tamaño máximo se mantiene en 10 milímetros (3/8" según ASTM). Para confeccionar las curvas granulométricas se consideran los datos del informe de ensayo N°25692/18 entregados por Laboratorio Geholab (Anexo 8.4) y para los áridos usados en faena su utiliza el Informe de pruebas de aptitud en condiciones de obra con áridos Baeza y aditivos Sika confeccionado por Astaldi (Astaldi, 2018).

En la Figura 2.24 se muestra la curva granulométrica del árido usado en las probetas D1, D2 y D3 correspondiente al Árido Cachapoal y la curva del árido usado en la Mina Chuquicamata correspondiente al Árido Baeza. La curva presenta diferencias, sin embargo, ambas se ajustan a los límites entregados por la EFNARC para hormigón proyectado (ICH, 2015).

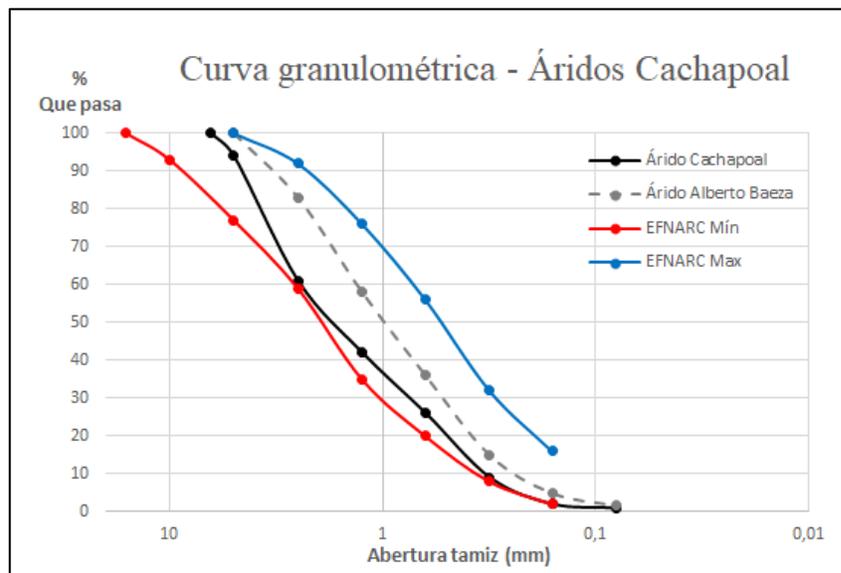


Figura 2.24: Curva granulométrica de áridos Cachapoal y áridos Baeza
Fuente: Elaboración propia en base a datos (Anexo 8.4) y (Astaldi, 2018)

2.5.4. Aditivos Plastocrete CB-400R y Sika Viscocrete PES

Plastificante Plastocrete CB-400R: es un aditivo marca SIKA reductor de agua con efecto retardador para el hormigón. Reduce el agua de amasado, retarda el tiempo de fraguado permitiendo transporte a larga distancia del hormigón, posee una menor pérdida de docilidad en el tiempo.

Está certificado como producto que no genera corrosión en armaduras de acero, según UNE-EN480-12. Además, cumple los requisitos como Aditivo Plastificante Retardador, tipo D, según NCh2182-2010. Este aditivo adicionalmente puede ser utilizado en conjunto con otros aditivos SIKA.

Finalmente, la dosificación entregada por parte de SIKA para las labores de Proyecto Subterráneo Chuquicamata es de 0,40%.

Hiperplastificante Sika Viscocrete PES: Es un aditivo marca SIKA reductor de agua de alta eficiencia, basado en polímeros sintéticos que permite mayor fluidez, alta cohesión y logra mantener la trabajabilidad de la mezcla en forma prolongada. Sus características permiten otorgar al hormigón un fuerte comportamiento autocompactante, incrementa el desarrollo de alta resistencia inicial, mejora el comportamiento en fluencia y retracción.

Está certificado como producto que no genera corrosión en armaduras de acero, según UNE-EN480-12. Además, cumple los requisitos como Aditivo Superplastificante, tipo F, según NCh2182-2010. Este aditivo adicionalmente puede ser utilizado en conjunto con otros aditivos SIKA.

Finalmente, la dosificación entregada de SIKA para las labores de Proyecto Subterráneo Chuquicamata es de 0,60%.

Capítulo 3

Metodología

El objetivo primario de este capítulo es entregar el diseño y ejecución de la metodología usada para cumplir con el objetivo general y específicos de la presente investigación.

Para realizar la validación de la factibilidad del uso de fibra reutilizada se compara el desempeño de la fibra en conjunto con el hormigón, replicando las condiciones de obra en el laboratorio. Se excluyen ensayos de hormigón de control, o sea probetas sin fibras, dado que en las bases de CODELCO se exige el contenido de fibra considerando que es un proyecto ya en desarrollo y que en la etapa pre-constructiva ya realizó la comparación entre hormigón con y sin fibra, por tanto, se prescinde del cotejo de estos. En cambio, el desarrollo de la investigación se extiende en la comparación entre las probetas con distinta dosificación de fibras (nuevas y recuperadas) y sus efectos. Además, se hace un análisis de la condición física (microscópica y macroscópica) entre una fibra nueva en contraste con la fibra recuperada.

Se decide estudiar el comportamiento de la docilidad en la mezcla y su desempeño en la resistencia a compresión, resistencia a la fisuración y tenacidad. De esta manera tenemos un estado de hormigón fresco y endurecido en análisis.

Las normas principales bajo las cuales se estudian los comportamientos y desempeños corresponden respectivamente a:

- NCh1019.Of2009 - Determinación de docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams.
- NCh1037:2009 - Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.
- UNE83515:2010 - Hormigones con fibras - Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción - Método Barcelona.

Se determina establecer 3 condiciones de dosificación para la fibra, que son el punto de comparación para el estudio de los resultados. Primero se tiene una dosificación con fibra 100% nueva, la cual desde ahora en adelante llamamos D1, una segunda condición que busca ver la interacción de ambas fibras en una misma mezcla, la cual cuenta con una dosificación de fibra 50% nueva y 50% reutilizada, desde ahora en adelante la llamamos D2. Por último, tendremos probetas confeccionadas con fibra 100% reutilizadas, abreviada como D3. Mediante estas dosificaciones se pretende basar la comparación de resultados.

Tabla 3.1: Nomenclatura de dosificación de fibras en probetas de ensayo

Nomenclatura	Barchip54 nueva	Barchip54 reutilizado
D1 (%)	100	0
D2 (%)	50	50
D3 (%)	0	100

Fuente: (Elaboración propia)

Para cada dosificación se aplica una muestra de Cono de Abrams, tres ensayos a compresión desglosado en un ensayo a 7 días de curado y dos ensayos cumplidos 28 días de curado. Para el Método de Barcelona se ensayan 2 probetas a 28 o más días de curado.

La dosificación que se usa en cada una de las diferentes probetas de ensayo se especifica en la Tabla 3.2 para 1 m³ de mezcla, resaltando que entre D1, D2 y D3 el único componente que se modifica es el porcentaje de fibra que corresponde a cada uno, suponiendo que el aporte es despreciable de las fibras en el volumen. Los aditivos (estabilizador y superplastificante) usados son SIKA con el ajuste de dosis recomendada de parte de este mismo proveedor.

Tabla 3.2: Resumen de componentes de la mezcla por m³

Tabla de dosificación por m3		Peso (kg)	Densidad (kg/m ³)	Volumen (m ³)
Razón A/C	0,4	-	-	-
Cemento	Melón extra	450,0	3000	0,150
Arena*	Planta Áridos Cachapoal	1714,5	2700	0,635
Agua Libre	Laboratorio Geholab	169,8	1000	-
Agua Total	Laboratorio Geholab	180,0	1000	0,180
Plastificante**	Sika Plastocrete CB-400R (0,40%)	1,8	1,17	2,455
Superplastificante**	Sika Viscocrete PES (0,60%)	2,7	1,10	1,538
Aire atrapado (3,5%)		-	-	0,035
Fibra de polipropileno	Barchip54 (D1; D2; D3)	5,0		
			Total	1,004

* Peso seco y densidad real seca

** unidad de densidad en kg/L y volumen en L

Fuente: (Elaboración propia)

Para el cálculo del volumen total, las cantidades de litros de aditivos deben excluirse, dado que al ser los aditivos solubles se considera su volumen como parte del agua de amasado (NCh1018, 2009, pág. 6). La relación agua/cemento se especifica según entrevista con el cliente de CODELCO, manteniendo una relación de 0,4 con una dosificación de 450 kg de cemento. Esto considera a su vez el informe ASTALDI de aptitud en condiciones de obra con aditivos SIKA entregado a CODELCO (Astaldi, 2018). La cantidad de fibra que se utiliza en las obras de Chuquicamata es de 5 kg/m³ de mezcla de hormigón.

En el laboratorio se calculan 60 litros de mezcla de hormigón (para cada confección de probetas con dosificación de fibra D1, D2 y D3) en la betonera de eje inclinado que se posee en el laboratorio Geholab. Con dicha cantidad se abarca la cantidad de material necesario para calcular la docilidad mediante Cono de Abrams y además confeccionar las 5 probetas cilíndricas de dimensiones 300mm x 150mm (altura y diámetro respectivamente). Estas probetas son confeccionadas según norma NCh1018 (Hormigón - Preparación de mezclas para ensayos en el laboratorio), excluyendo el bombeo que se hace en el hormigón proyectado, en consecuencia, no se aplican acelerantes en ninguna de las tres mezclas.

Las cantidades exactas utilizadas se exhiben en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3: Resumen de dosificación en betonera para 60 lts

Tabla de dosificación para 60 lts		Peso
Razón A/C	0,4	-
Cemento	Melón extra	27 kg
Arena	Planta Áridos Cachapoal	102,87 kg
Agua Libre	Laboratorio Geholab	10,23 lts
Agua Total	Laboratorio Geholab	10,80 lts
Plastificante	Sika Plastocrete CB-400R (0,40%)	92,31 mL
Superplastificante	Sika Viscocrete PES (0,60%)	147,27 mL
Aire atrapado (3,5%)		-
Fibra de polipropileno	Barchip54 - D1; D2; D3	300 grms

Fuente: (Elaboración propia)

En la probeta cilíndrica de dimensiones 300mm x 150mm se realiza un corte a la mitad de altura por un plano perpendicular al eje de simetría de la probeta para el ensayo Método de Barcelona, estando esto permitido en la norma UNE83515. Tras el corte, las bases de la probeta deben ser sensiblemente planas, sin irregularidades en la zona de contacto con los discos superiores a 2 mm, y perpendiculares a su eje longitudinal con una desviación máxima de 5° (UNE83515:2010, pág. 4).

Los materiales y equipos usados en laboratorio quedan especificados en el capítulo 2.5 Especificaciones técnicas con su debida justificación de procedencia.

Finalmente, tomando en cuenta los antecedentes del proceso de recuperación de la fibra, el estado del arte acerca del hormigón reforzado con fibras y los resultados de las pruebas de desempeño se procede a concluir el nivel de factibilidad que tiene la reutilización de las fibras, el uso posible al que quedan limitados y entregar una propuesta de procedimiento para la recuperación, almacenamiento y condición última de la fibra en base a las observaciones expuestas.

Capítulo 4

Resultados

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos de esta campaña experimental. En primer lugar, se muestran los resultados de docilidad para el hormigón fresco, luego el desempeño que tuvieron las probetas a esfuerzo de compresión, para continuar con los resultados del ensayo Barcelona, indicando la absorción de energía y resistencia a fisuración. Por último, se entrega un análisis del estado físico de la fibra recuperada.

4.1. Resultados de determinación de docilidad mediante método del asentamiento del cono de Abrams

Los resultados del ensayo del método de cono de Abrams según la norma NCh1019.Of2009 se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4.1: Resultados de asentamiento de Abrams según NCh1019

Tipo de probeta	Asentamiento (cm)	Δ^2
D1 (100% F. nueva)	22	± 3
D2 (F. 50% nueva - 50% reutilizada)	22	± 3
D3 (100% F. reutilizada)	21	± 3

Fuente: (Elaboración propia en base a resultados en Laboratorio Geholab)

Para completar la información del ensayo se vuelve a dejar en claro que las preparaciones de las mezclas de hormigón se diferencian solo en el tipo de fibra de cada una, pero la dosificación de la mezcla se mantiene constante para los 3 tipos de dosificaciones. A su vez, la temperatura ambiente al momento de confección y ensayo de las probetas está dentro de lo impuesto por la norma chilena

² Tolerancia +-3 NCh170:2016

y de los requisitos de calidad de CODELCO. El hormigón al momento de tomar su temperatura presenta los siguientes valores:



Figura 4.1: Registro de temperatura del hormigón y temperatura ambiente.
Fuente: (Elaboración propia)

4.2. Resultados de resistencia a compresión según norma NCh1037:2009

Para el ensayo a compresión, realizado según la norma NCh437, se realizaron 3 probetas por cada dosificación, ensayando una probeta a los 7 días y dos probetas a los 28 días. En total, se ensayan 9 probetas de las cuales todas presentaron un modo de falla correcto.

En la Figura 4.2 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para el ensayo a 7 y 28 días, siendo este último el promedio de los valores encontrados para las dos probetas de 28 días. Los valores del ensayo a compresión de las 9 probetas se encuentran en el Anexo 8.5.

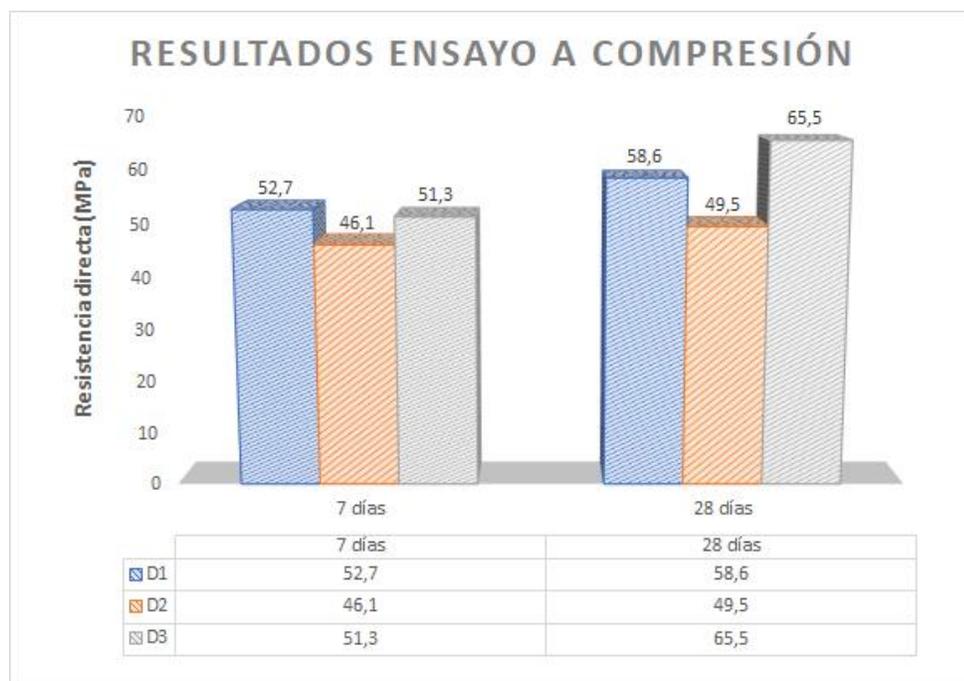


Figura 4.2: Gráfica de resumen de resultados de ensayos a compresión para D1, D2 y D3.
Fuente: (Elaboración propia en base a informe Geholab)

Se entrega además un gráfico en la Figura 4.3 para apreciar la evolución de la resistencia a compresión de las probetas. Los valores de resistencia en el gráfico para los 28 días corresponden al promedio entre los 2 valores que tiene cada dosificación.

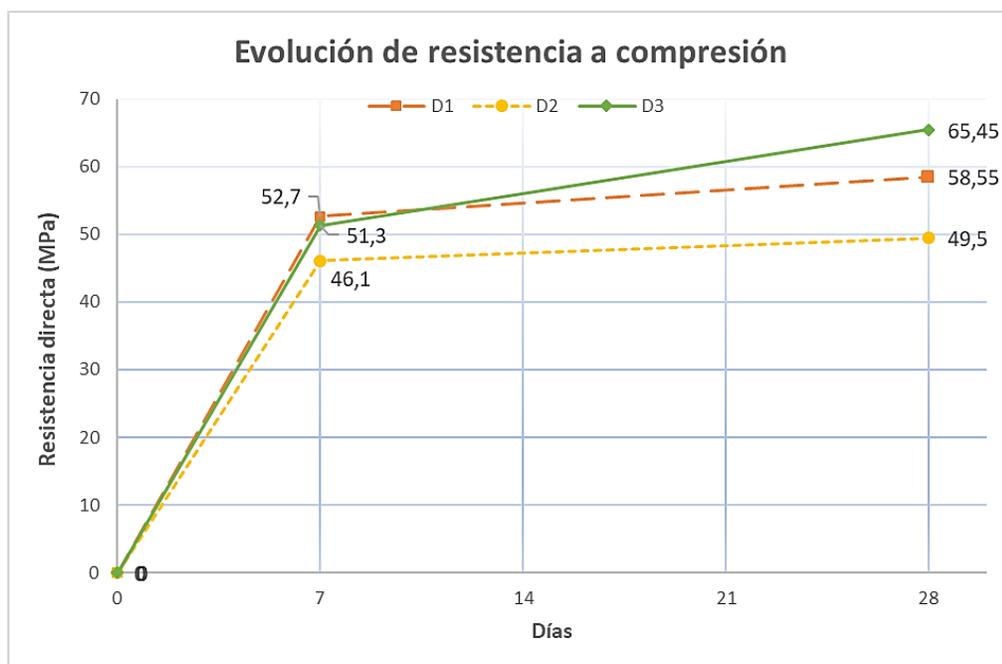


Figura 4.3: Evolución de resistencia a compresión de probetas de ensayo.
Fuente: (Elaboración propia en base a informe Geholab)

Por último, se anexan las tablas con las dimensiones, masa y características (segregación, porosidad, carga máxima corregido, resistencia e indicador de rotura correcta) entregadas en el informe de Geholab para cada grupo de muestras D1, D2 y D3 (Anexo 8.5).

4.3. Resultados de Absorción de energía según EN 83515:2010

A continuación, se dan a conocer los resultados del ensayo EN 83515 (ensayo Barcelona) para las dosificaciones D1, D2 y D3 mediante los datos entregados por parte del laboratorio Llay-Llay. Se realizaron 2 ensayos por cada dosificación, haciendo un total de 6 ensayo a Barcelona y las edades a las cuales se ensayaron fueron a los 115 días para D1-D2 y 92 días para D3, en busca de caracterizar el comportamiento a un mediano plazo (90-120 días).

En cada gráfico de cada una de las muestras se da a conocer la curva carga-deformación y la curva de absorción de energía. La primera curva posee un primer comportamiento elástico lineal

hasta la fisuración, para luego decaer de forma no lineal observando el comportamiento residual de la probeta. La segunda curva mostrada en el gráfico da a conocer la energía que es capaz de absorber la probeta en el proceso de deformación circunferencial que sufre la cadena extensiométrica colocada en la probeta. Se registran los valores de carga (N), resistencia (N/mm^2) y energía (J) al momento de llegar a la deformación de fisuración, luego 2 mm, 2,5 mm, 4 mm y 6 mm como valor límite para la prueba.

Al momento de ocurrir la fisuración, en los gráficos se produce una caída abrupta del pistón con lo que se produce un efecto en donde la muestra se rompe y el pistón pasa en banda, hasta que estabiliza la velocidad provocando un efecto de loop para los gráficos carga versus deformación. Para obtener un mejor perfil de estos se requiere de un pistón de doble acción que tenga un control de velocidad más preciso e impida la caída del pistón. Sin embargo, los resultados mostrados cumplen perfectamente con la norma NCh17025:2017 de "Requisitos Generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración" del ensayo EN 83515 (esta norma además tiene en consideración la última versión de la ISO 9001).

En la siguiente página se presentan los resultados del ensayo EN83515:2010 (Método Barcelona) para las muestras D1, D2 y D3 respectivamente:

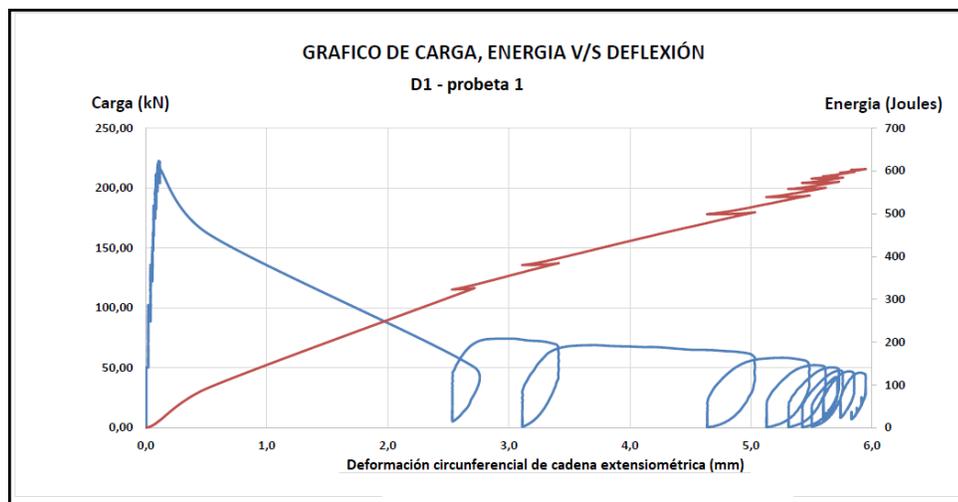


Figura 4.4: Gráfico de carga y energía versus deflexión circunferencial para D1 (1)

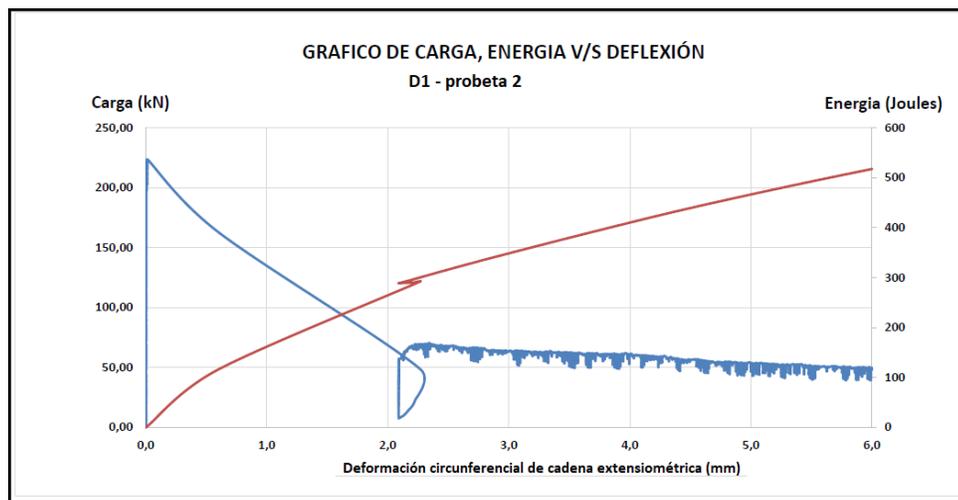


Figura 4.5: Gráfico de carga y energía versus deflexión circunferencial para D1 (2)

Tabla 4.2: Resultados de carga, resistencia y energía para D1

Ensayo	TCOD (mm)	Carga (N)	Resistencia(N/mm ²)	Energía (Joule)
D1 (1)	Fisuración	222620	5,55	0
	2	161470	4,03	93
	2,5	161470	4,03	93
	4	67750	1,69	435
	6	44750	1,12	608
D1 (2)	Fisuración	223680	5,62	0
	2	162940	4,10	115
	2,5	66090	1,66	316
	4	60620	1,52	410
	6	48710	1,22	517

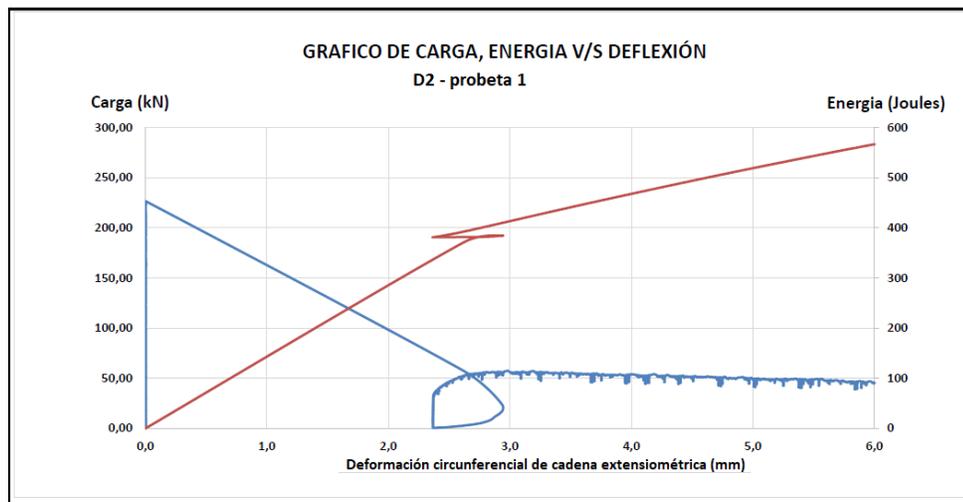


Figura 4.6: Gráfico de carga y energía versus deflexión circunferencial para D2 (1)

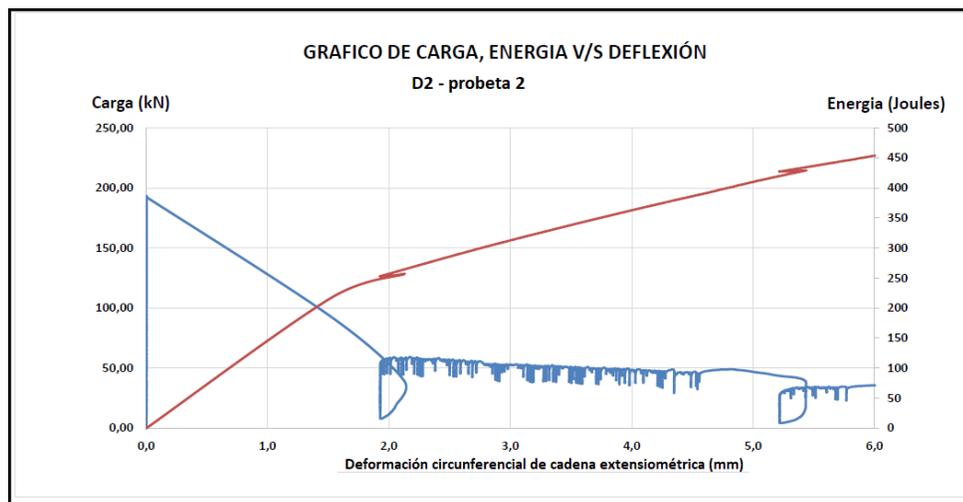


Figura 4.7: Gráfico de carga y energía versus deflexión circunferencial para D2 (2)

Tabla 4.3: Resultados de carga, resistencia y energía para D2

Ensayo	TCOD (mm)	Carga (N)	Resistencia(N/mm ²)	Energía (Joule)
D2 (1)	Fisuración	226470	5,70	0
	2	97115	2,44	0
	2,5	45710	1,15	386
	4	53710	1,35	468
	6	45200	1,14	567
D2 (2)	Fisuración	193170	4,88	0
	2	58160	1,47	257
	2,5	57140	1,44	285
	4	48530	1,23	363
	6	35450	0,90	453

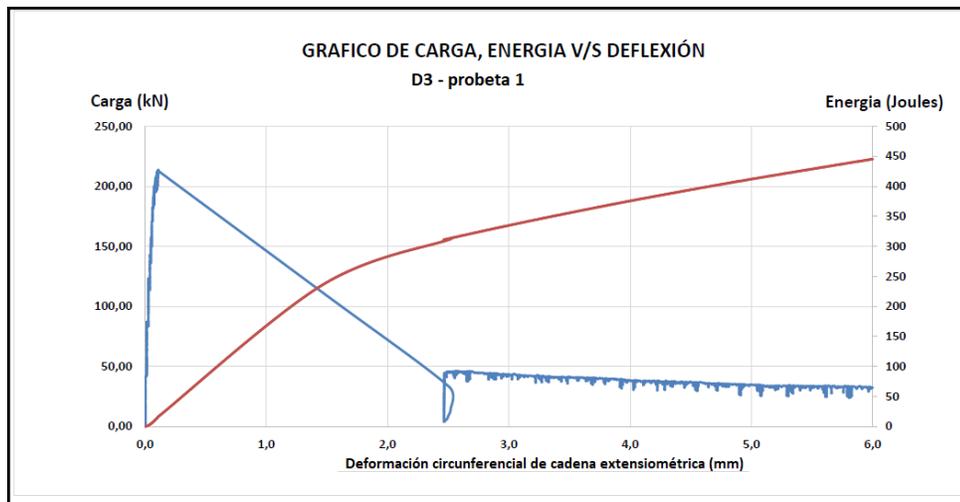


Figura 4.8: Gráfico de carga y energía versus deflexión circunferencial para D3 (1)

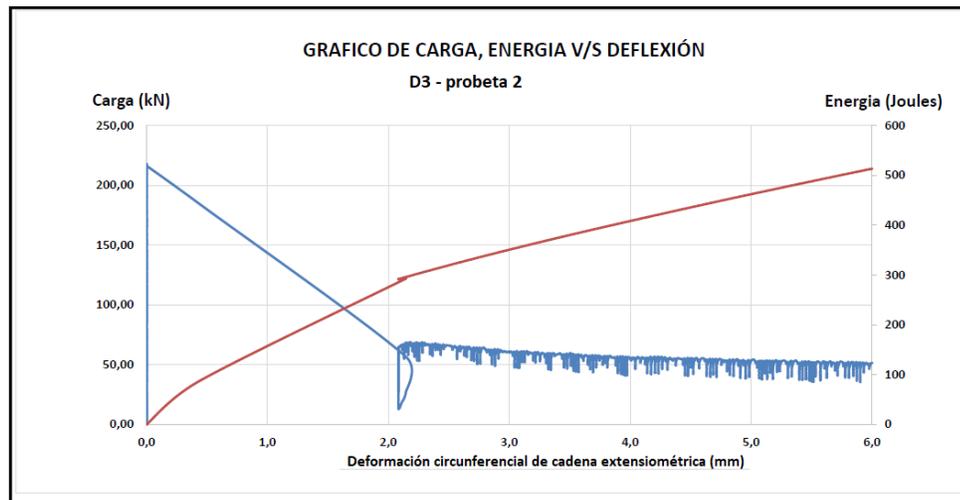


Figura 4.9: Gráfico de carga y energía versus deflexión circunferencial para D3 (2)

Tabla 4.4: Resultados de carga, resistencia y energía para D3

Ensayo	TCOD (mm)	Carga (N)	Resistencia(N/mm ²)	Energía (Joule)
D3 (1)	Fisuración	213730	5,35	0
	2	111600	2,79	236
	2,5	45320	1,13	313
	4	38150	0,95	376
	6	32300	0,81	445
D3 (2)	Fisuración	217790	5,47	0
	2	184540	4,63	87
	2,5	65980	1,66	319
	4	54740	1,37	408
	6	51400	1,29	513

4.4. Análisis de condición física de la fibra

En la Figura 4.10 se puede observar el estado de las fibras recuperadas con respecto a las fibras nuevas, podemos observar que a primera vista presentan diferencias en la tonalidad de cada una. Las fibras nuevas presentan un color cristalino, mientras que las fibras recuperadas presentan un color opaco grisáceo. Como el proceso de recuperación no considera un nuevo lavado de la fibra, existen residuos que se mantiene adherida a la fibra por la mezcla de hormigón y agua. Otra diferencia observable son las puntas de las fibras recuperadas que presentan un mayor desgaste, observando daños menores en estas partes de la fibra en al menos 50% de la muestra. El largo y ancho no se ven afectados en las fibras recuperadas.

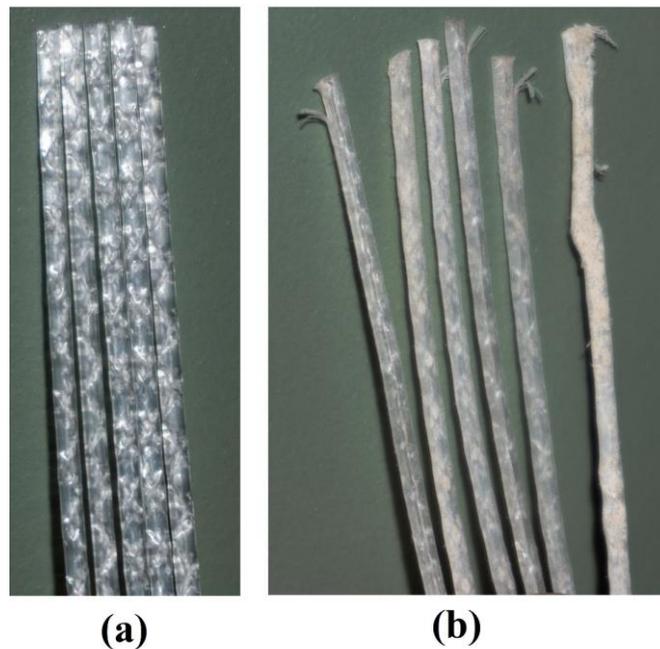
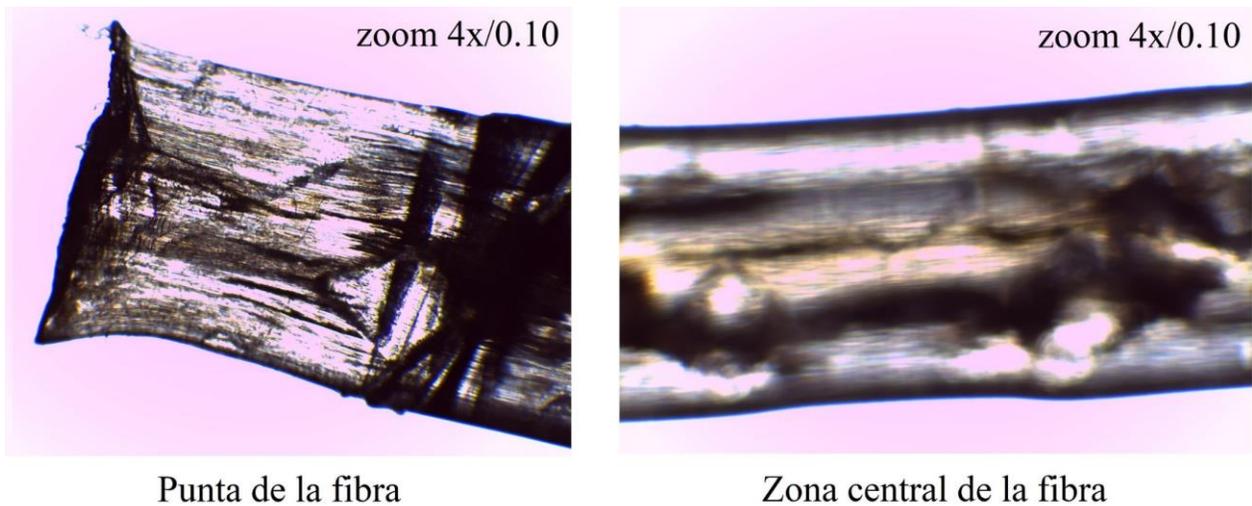


Figura 4.10: (a) Fibra Barchip54 nueva – (b) Fibra Barchip54 recuperada.
Fuente: (Elaboración propia)

Al observar las fibras en el microscopio para revisar su estructura, encontramos que no presenta daños ni modificaciones en su geometría interna. Solo es apreciable los restos de residuos que se reflejan en la mayor cantidad de manchas en la Figura 4.12:



Punta de la fibra

Zona central de la fibra

Figura 4.11: Fotografías en microscopio con lente Leica Plan 4x/0.10 de fibra Barchip54 nueva. Fuente: (Elaboración propia)



Zona central de la fibra

Figura 4.12: Fotografía en microscopio con lente Leica Plan 4x/0.10 de fibra Barchip54 recuperada. Fuente: (Elaboración propia)

La fibra en su estado inicial tiene a lo largo de la parte central de un lado de la cara de la fibra surcos en relieve en forma de zigzag, buscando posiblemente tener una mayor adherencia matriz/fibra. En las fibras recuperadas estos surcos se ven tapados por la suciedad que tiene las fibras al recuperarlas. Cabe destacar que esta suciedad es una especie de polvillo que se incrusta, pero es de fácil remoción con agua potable.



Figura 4.13: Imagen indicativa del sector de surcos en la fibra Barchip54.
Fuente: (Elaboración propia)

4.5. Análisis de resultados

4.5.1. Trabajabilidad - NCh1019

Al momento de analizar la trabajabilidad, los resultados indican que la influencia de la fibra reutilizada es el mismo efecto que produce la fibra nueva. Los resultados de asentamiento de cono son prácticamente idénticos para las 3 dosificaciones. Además, los valores de asentamiento se encuentran dentro del rango acepto y pedido en los requisitos de calidad de CODELCO.

4.5.2. Ensayo a compresión - NCh1037

En lo que respecta a los resultados de ensayo de resistencia a compresión, se aprecia que la menor resistencia la obtuvo D2, con la composición de fibra mixta, tanto para la resistencia a los 7 como a los 28 días. A los 7 días la mayor resistencia la obtuvo D1, siendo D2 un 13% menor a D1 y D3 un 3% más baja que D1. A los 28 días, D3 es la que obtiene los mejores resultados sobrepasando los 60 MPa, siendo D2 un 24% menor que D3 y D1 alcanza una resistencia 11% más baja que D3.

Al considerar el estado del arte respecto al efecto de la fibra de polipropileno en el ensayo a compresión del hormigón se observa que las variaciones en los resultados son en base mayormente a la cantidad de fibra que hay en el volumen del hormigón, sin embargo, en los presentes resultados la cantidad de fibra por metro cúbico de hormigón no varía. Esto hace pensar que los factores como temperatura ambiental y el viento provocan las diferencias en las resistencias. Esto se refleja en la Figura 4.1 en donde las probetas D3 cuentan con la mayor temperatura ambiental (18,6°C) y la

mayor temperatura del hormigón 20,4°C. A su vez, D2 que cuenta con los resultados más bajos en resistencia a compresión está expuesta a una temperatura ambiental de 13,9°C (al igual que D1) y con la menor temperatura de hormigón (13,7°C).

Este punto queda expuesto para que sea considerado y contrastado ante una nueva campaña experimental que se desee hacer, pudiendo confirmar o descartar esta variable de temperatura ante las diferencias presentadas, especialmente en D2, que presenta el menor desempeño con una configuración mixta de fibra de polipropileno nueva y reutilizada.

Adicionalmente a lo expuesto en el párrafo anterior, los resultados que obtenemos para compresión son altos considerando que el hormigón está especificado a $f'_c = 30$ MPa, pero no hay que obviar que son obtenidos para hormigón moldeado y no ensayos de probetas extraídas mediante testigos.

Una manera de no eludir esta diferencia sería considerar la tolerancia que se permite entre los resultados de probeta moldeada y mediante testigos (que permite una resistencia 20% menor en testigos) y realizar una inversión de la tolerancia. Esto consiste que a partir de la resistencia para el hormigón moldeado se considere solo el 80% de resistencia de este para suponer cual sería la resistencia del hormigón proyectado en caso de haber sido una probeta obtenida mediante testigo. Con esto también se engloba el efecto del acelerante presente en shotcrete que indican una influencia del 15% de disminución en la resistencia, siendo este porcentaje menor al usado ya para aplicar la tolerancia.

Usando este supuesto de resistencia teórica se encuentra que las 3 dosificaciones alcanzan incluso a los 7 días la resistencia especificada de 30 MPa. Las nuevas resistencias teóricas del hormigón se encuentran en la Tabla 4.5:

Tabla 4.5: Resistencia directa teórica a compresión aplicando tolerancia entre probeta moldeada y mediante testigo

Resistencia Directa a Compresión (tolerancia 20% menor)			
Probeta	D1 (MPa)	D2 (MPa)	D3 (MPa)
7 días	42,2	36,9	41,0
28 días	47,0	39,4	52,5
28 días	46,7	39,8	52,2

Fuente: (Elaboración propia)

Además, se indican en los informes del Laboratorio Geholab que todas las probetas no presentan segregación y tienen una correcta rotura, en las muestras, lo que permite validar los valores obtenidos. También es posible observar en la Figura 4.3 en el hormigón una alta resistencia a los 7 días, alcanzando en D1 y D2 el 90% y 94% respectivamente de su resistencia final a los 28 días, mientras que en D3 se alcanza un 78% de la resistencia final.

Establecer una línea con lo que serían ensayos mediante testigos nos permite correlacionar los requisitos exigidos por CODELCO (véase sección 2.4.4). Como resultado, existiría un buen pronóstico en cumplir con la resistencia exigida para ya en el día 7 de maduración del hormigón ensayado. En caso de querer cuantificar el aporte de la fibra de polipropileno en este resultado, sería necesario realizar pruebas a hormigón de control con 0% de fibra de refuerzo.

4.5.3. Ensayo Barcelona - EN83515

Para las edades ensayas en el ensayo Barcelona (92 y 115 días), se espera que luego de los 90 días el hormigón ya haya alcanzado su resistencia final, por lo tanto, la diferencia entre días ensayados no es considerada como un factor primordial para el análisis de los resultados de estos.

Como nuestro punto de comparación se basa en el desempeño entre fibra Barchip54 nueva y las dosificaciones D2 y D3 propuestas con fibra reutilizada, y dada la baja dispersión en la resistencia de fisuración (resistencia de 5,62 MPa y 5,55 MPa) se decide comparar los resultados de fisuración y energía en base al promedio de lo obtenido en D1(1) y D1(2). Con este valor promedio se puede tener una observación más clara de las variaciones en los resultados por cada probeta D2 y D3. A continuación se muestra la Tabla 4.6 con los valores y diferencias porcentuales además de la gráfica en la Figura 4.14 con los valores de la tabla:

Tabla 4.6: Tabla comparativa de resultados de fisuración y energía en ensayo Barcelona

Probeta	Resistencia fisuración (MPa)	Diferencia %	Energía _{6mm} (Joule)	Diferencia %
D1	5,59	0%	563	0%
D2 (1)	5,70	2%	567	1%
D2 (2)	4,88	-13%	453	-19%
D3 (1)	5,35	-4%	445	-21%
D3 (2)	5,47	-2%	513	-9%

Fuente: (Elaboración propia)

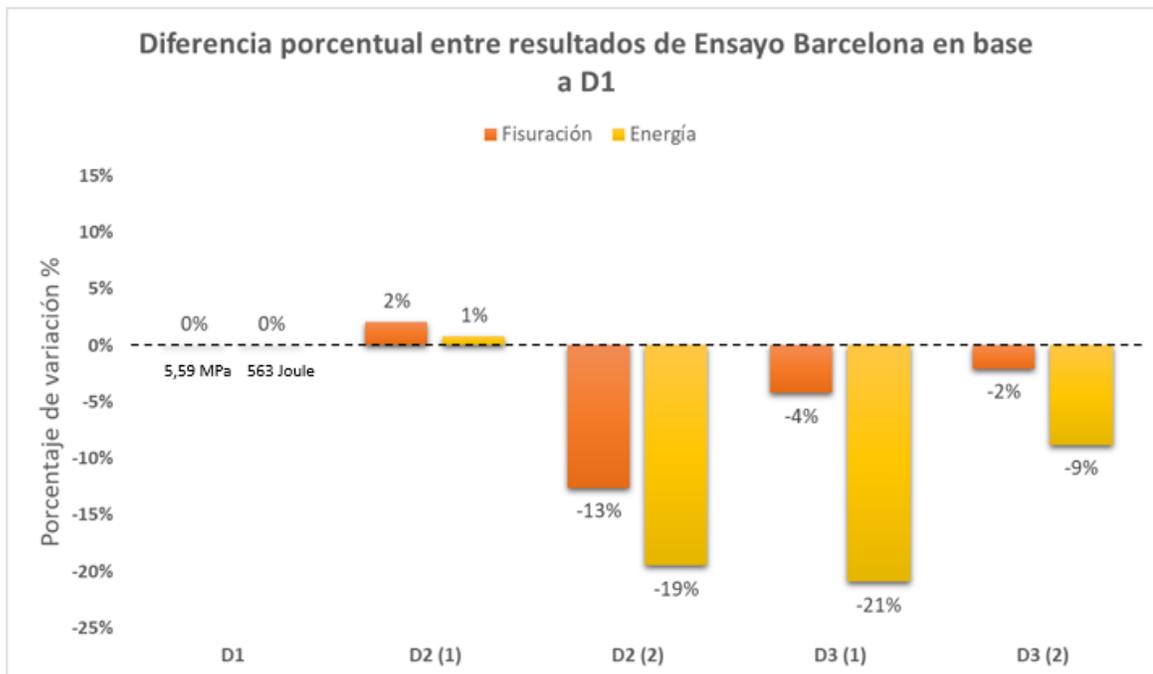


Figura 4.14: Gráfica comparativa de resultados porcentuales de fisuración y energía en ensayo Barcelona. Fuente: (Elaboración propia)

De la tabla y gráfica es posible apreciar que para D2 no se obtiene un desempeño claro tanto para fisuración como para energía, teniendo en primera instancia un ensayo con buen desempeño, incluso mejor que D1, pero que cae abruptamente en el desempeño cuando se analizan los resultados de su segunda probeta D2 (2), obteniendo un 13% y 19% de menor resistencias y capacidad de absorción energía respectivamente.

En lo que respecta a D3, se obtiene un buen desempeño en la resistencia a fisuración, obteniendo valores solo menores de un 4% y 2% para cada probeta con respecto a D1. Sin embargo, el mayor efecto de ser una probeta con 100% fibra recuperada se ve reflejada en el desempeño a tenacidad que tiene, presentando una variación de 21% menor y 9% menor con respecto a D1.

A continuación, se muestran las curvas de energía en un mismo gráfico, separando las curvas con mejor desempeño de cada dosificación y otro gráfico con las curvas de peor desempeño en cada dosificación.

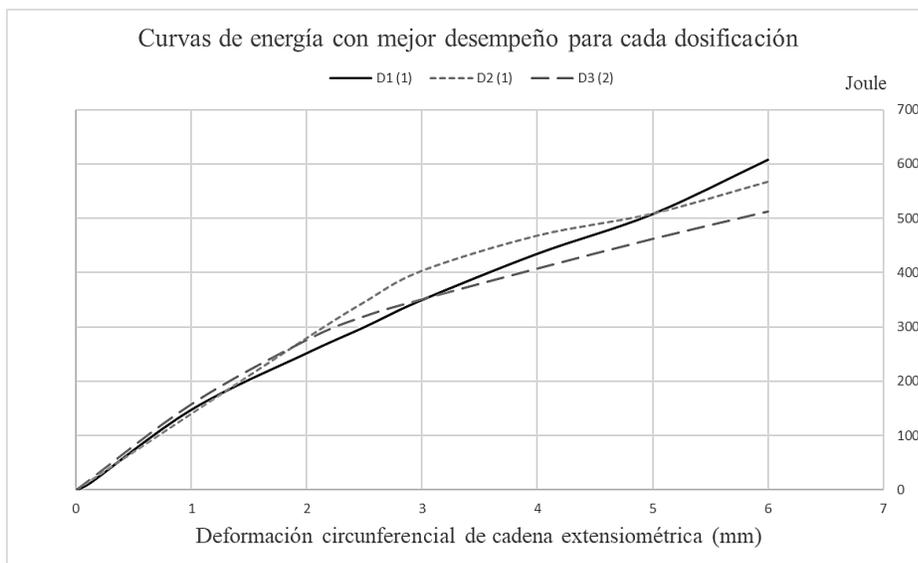


Figura 4.15: Curvas de energía para D1, D2 y D3 con mejor desempeño. Fuente: (Elaboración propia)

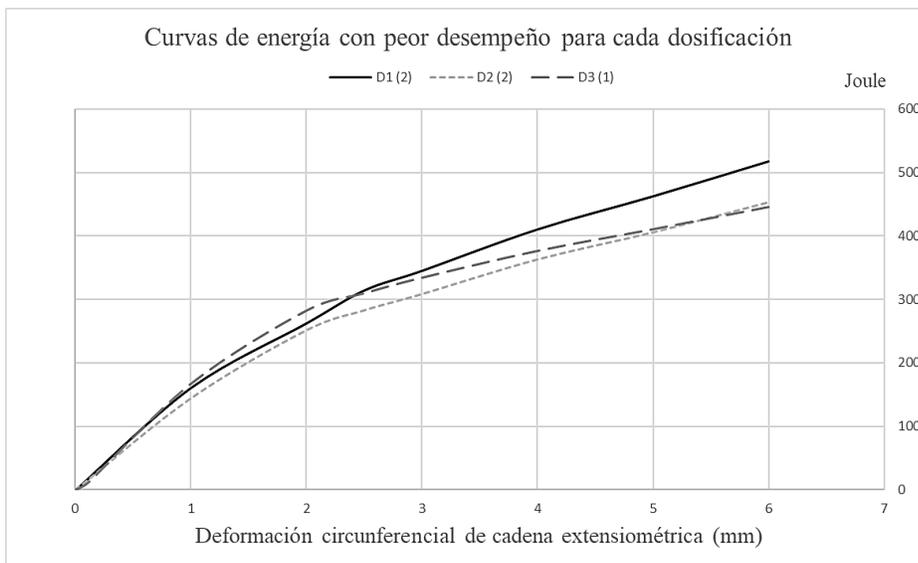


Figura 4.16: Curvas de energía para D1, D2 y D3 con desempeño. Fuente: (Elaboración propia)

Es posible apreciar que luego de la deformación de 2 milímetros, las curvas van presentando mayores diferencias, esto se aprecia mejor en la siguiente imagen:

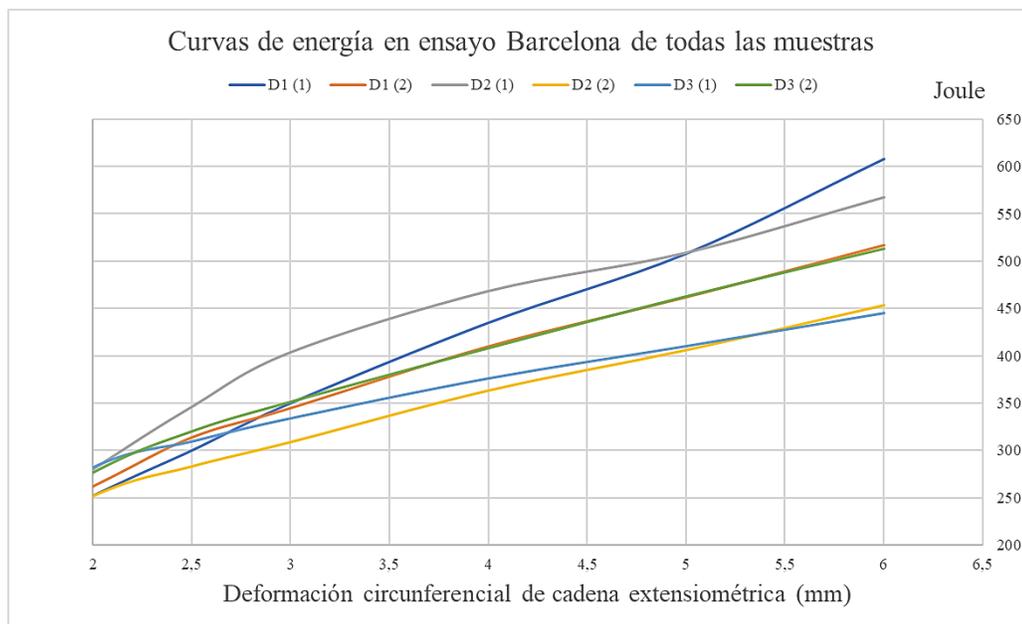


Figura 4.17: Curvas de desarrollo para la totalidad de las muestras entre 2 mm y 6 mm de deformación. Fuente: (Elaboración propia a partir de resultados de Lab. Llay-Llay)

En la Figura 4.17 es posible apreciar el comportamiento en las curvas de energía más enfocado a luego de la fisuración. Se aprecia como D1(1) es la muestra que tiene la mayor capacidad de absorción de energía, a su vez D2(2) y D3(1) son los que presentan menor absorción. Esto nos da a entender que existe un menor desempeño cuando se emplea fibra reutilizada.

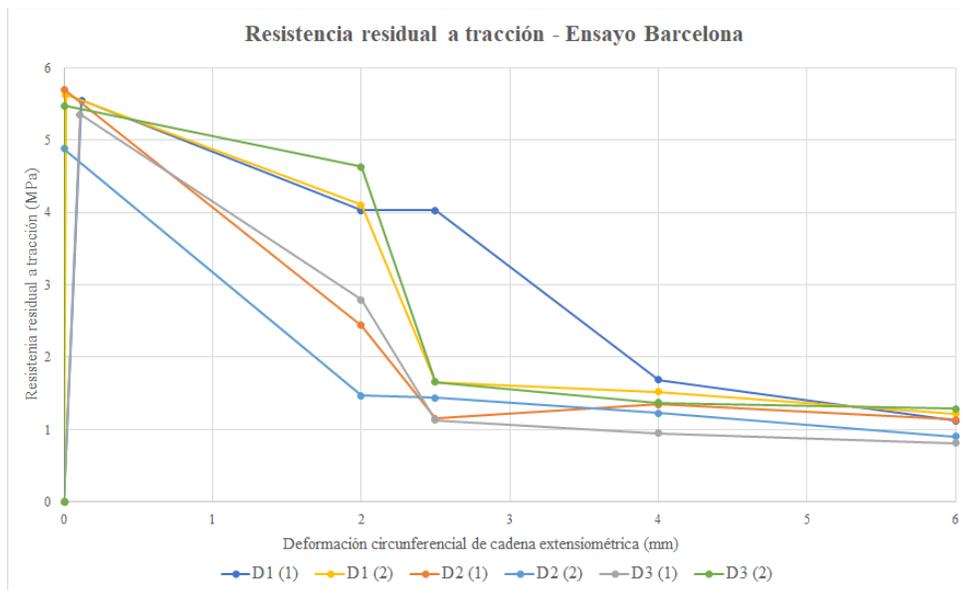


Figura 4.18: Curvas de resistencia residual de tracción en ensayo Barcelona. Fuente: (Elaboración propia a partir de resultados de Lab. Llay-Llay).

A su vez podemos apreciar en la Figura 4.18 el comportamiento de las resistencias residuales a tracción presente en los ensayos de Barcelona. Aquí nuevamente es apreciable como las probetas con solo fibra nueva presentan comportamientos más favorables y con mejor desempeño. La diferencia es más evidente en el proceso de deformación circunferencial de la probeta hasta los 4 mm y luego de sobrepasar esta deformación, las resistencias siguen disminuyendo y convergiendo a valores cercanos.

Volviendo a las curvas de energía para las diferentes probetas, es posible aplicar la correlación (véase Figura 2.17) entregada por Espinoza (2017) a los resultados de capacidad de absorción de energía del ensayo Barcelona y utilizando un valor de α igual a 1,28 (caso de α más desfavorable) se obtienen los siguientes valores:

Tabla 4.7: Correlación de resultados de capacidad de absorción de energía entre ensayo EFNARC y Barcelona

Probeta	$E_{6\text{ mm}}^{\text{Barcelona}}$ (Joule)	$E_{25\text{ mm}}^{\text{EFNARC}}$ (Joule)	Diferencia
D1(1)	608	1157	1138
D1 (2)	517	1118	
D2 (1)	567	1140	0,21%
D2 (2)	453	1088	-4,63%
D3 (1)	445	1084	-5,03%
D3 (2)	513	1117	-1,92%

Fuente: Elaboración propia

El valor 1138 en la Tabla 4.7, es el promedio de la energía en Joule de EFNARC para D1. Luego los porcentajes son las variaciones de la energía de cada probeta D2 y D3 respecto a 1138 Joules de D1 promedio.

Podemos observar en la Tabla 4.7 que, a pesar de tener una disminución en la capacidad de absorción de energía, las dosificaciones que utilizan fibras recuperadas (D2 y D3) logran estar en el rango de aplicación "Capa primaria roca dura, alta deformación" de la tabla dispuesta en las bases de requisitos de calidad de CODELCO para el shotcrete (véase Figura 2.22: Requisitos de absorción de energía – Panel cuadrado EFNARC EN 14488-5. Fuente:).

Cuando se analiza el comportamiento de las curvas de carga-deformación circunferencial, se encuentra luego del momento de fisuración inicial de las muestras, que existen saltos grandes de deformaciones, llegando en casi todas las probetas a un nivel de deformación abrupto de 2 mm o más y luego de este nivel de deformación la fibra ejerce mayor control de deformación. Esto indica una falla inicial frágil, en donde no se acoplan la deformación de la fibra y el hormigón induciendo

este fenómeno, donde luego de cierta deformación la fibra logra anclarse correctamente y actúa como refuerzo.



Figura 4.19: Patrones de falla en probetas D1, D2 y D3. Fuente: (Elaboración propia)

Otro punto de interés es el patrón de falla en las probetas muestreadas del ensayo Barcelona, las cuales cumplen con el modo teórico esperado (véase Figura 4.19). A su vez, es de gran valor conocer el modo de falla de las fibras. Al momento de inspeccionar el interior de las grietas, no es posible observar de forma clara y evidente el modo de falla que tienen las fibras, sin embargo, es posible observar que existe mayor cantidad de fibras en las grietas para D3 respecto a D1. En D2 no es posible apreciar el efecto claro ante el bajo espesor de las grietas, por tanto, no se hacen observaciones.

Para descartar la presencia de nidos y segregación en las muestras ensayadas, se procedió en la abertura de las probetas siguiendo los planos de falla, descartando ambos fenómenos al momento de inspeccionarlas. Se aprecia que existe una buena distribución de los áridos y una buena uniformidad en la distribución de las fibras. A pesar de la porosidad que hay, al ser mínima, no es capaz de inducir fallas por desunión entre la matriz de hormigón y la fibra de polipropileno. Con esto se pueden descartar estos factores como influyentes en los resultados obtenidos para el ensayo Barcelona.

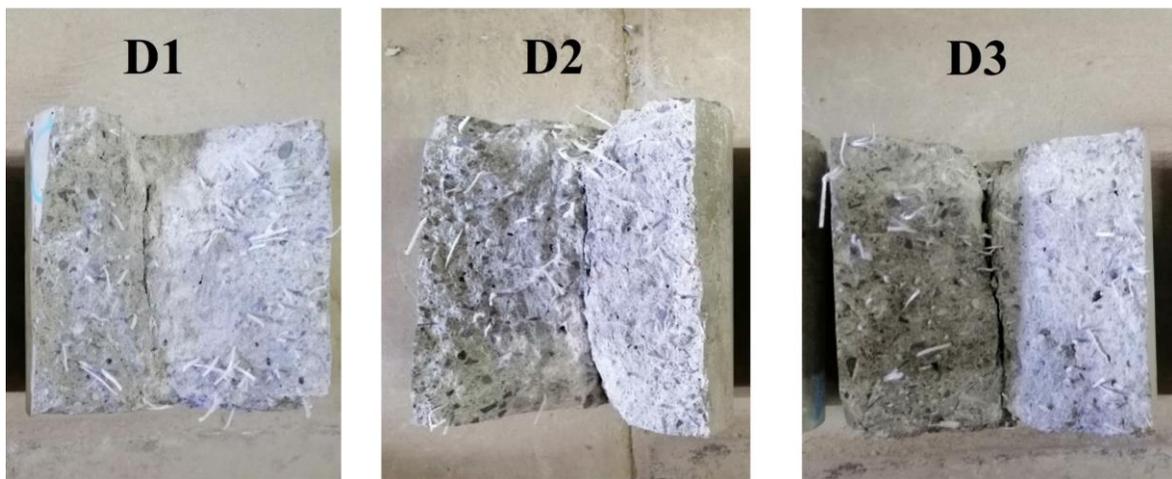


Figura 4.20: Distribución interior de áridos y fibras en las probetas.
Fuente: (Elaboración propia)

Englobando el conjunto de apreciaciones hechas respecto a la capacidad de absorción de energía en las dosificaciones, es posible identificar que la causa de la disminución en la tenacidad de parte de D2 y D3 se deben a fallas que sufren las fibras por extracción (pull-out). Las fibras reutilizadas responden de buena forma en la resistencia a la fisuración, por lo tanto, es de esperar que sus propiedades y capacidades resistentes no hayan sido afectadas. El residuo que queda en las fibras recuperadas es lo que provoca que no se logre en todas las fibras una correcta adherencia con la matriz, disminuyendo los cambios de relieve que tiene la fibra y que son beneficiosos.

Capítulo 5

Propuesta Procedimiento de reutilización

Luego de los análisis realizados a las fibras recuperadas en las piscinas de lavado, se procede a entregar la propuesta de proceso de recuperación:

Cómo fue planteado en un principio no solo se busca poder reutilizar, si no, mantener una línea de recuperación lo más simplificada posible. En visto de lo anterior, es factible luego de las pruebas obtenidas, mantener el proceso de recuperación visto en el diagrama de flujo de la Figura 2.9 con las siguientes consideraciones:

- 1) Ante la pérdida de capacidad de absorción de energía en la fibra reutilizada en D2 y D3, no se considera el uso de esta fibra para el sostenimiento permanente ni en los sostenimientos preliminares (también llamado sostenimiento de avance) en los túneles de PMCHS. Sin embargo, es factible el uso de la fibra recuperada en revestimientos secundarios y de sellado.
- 2) Es posible la incorporación de la fibra recuperada en construcciones de menor riesgo como son pavimentos y estructuras prefabricadas livianas y semi-livianas.³
- 3) Al momento de usar la fibra recuperada, utilizar la dosificación D3 (fibra 100% recuperada) que ha entregado resultados menos variables entre capacidad de compresión y capacidad de absorción de energía.
- 4) La fibra recuperada al momento de reutilizarse e incorporarse al hormigón debe estar seca. Por lo tanto, es necesario que luego de ser recolectadas en el proceso 4 Flotación y recolección, las fibras se dejen en reposo hasta alcanzar el estado seco.
- 5) Se aprecia que la fibra al estar en exposición a los rayos UV, no presenta efectos negativos por influencia de este factor, lo cual va acorde a la ficha técnica de la fibra Barchip54 (Anexo 8.2) que menciona la resistencia que presenta a los rayos UV. Sin embargo, se sugiere mantener el almacenaje de la fibra en un sitio que no esté expuesto a los rayos UV y/o en las mismas condiciones de exposición que la fibra nueva.

³ Se recomienda para mayor certeza realizar ensayo a flexión con fibra reutilizada para el hormigón destinado a pavimentos.

- 6) Se debe tapar el contenedor de fibras recuperadas para evitar polución producto del viento.
- 7) No se aprecia en el proceso actual de recuperación agentes externos adicionales a los ya mencionados como son los residuos impregnados en la fibra y los rayos UV, que estén siendo influyentes en el desempeño de la fibra.
- 8) Se considera diferente la recuperación desde el camión mixer, a recuperar fibra del rebote de la proyección del shotcrete debido a que este último está en contacto con un aditivo adicional (acelerante) que puede provocar cambiar sus propiedades no cuantificados.
- 9) Se descarta la utilización adicional de agua continental o agua de mar desalinizada para un nuevo lavado de las fibras recuperadas en la piscina de lavado.
- 10) Debido al uso recomendado para las fibras en construcciones de menor riesgo complementado con lo observado en el análisis de condiciones físicas de las fibras recuperadas, se permite la nueva reutilización de la fibra al momento de limpiar un camión mixer que contenga fibra recuperada en su interior.

Capítulo 6

Conclusiones

En el presente capítulo se entregan las principales conclusiones encontradas luego de las pruebas y antecedentes recopilados. Estas conclusiones ensamblan el contexto tanto de los impactos presente en la fibra de polipropileno reutilizada como de los efectos y consecuencias externas que logra su reutilización.

En primer lugar, se establece que los actuales resultados aprontan la factibilidad de usar las fibras teniendo en consideración que su desempeño a la tenacidad es más bajo, con un margen incluso del 20% menor con respecto al desempeño del shotcrete fortificado con fibra nueva. Se entrega una propuesta de procedimiento atendiendo al actual proceso de recuperación que existe, entregando consideraciones necesarias para su reutilización y almacenamiento.

Quedan establecidos en el marco teórico los antecedentes de los diversos efectos que tiene el hormigón reforzado con fibras de polipropileno. Además, se logran ensayar de forma apropiada las probetas confeccionadas, teniendo correctos modos de ruptura, con una correcta distribución tanto del árido como de las fibras, por consiguiente, sin la presencia de nidos en las muestras.

Es necesario aclarar que las observaciones son a partir de una cantidad limitada y escasa de ensayos y, por lo tanto, no es posible ser categóricos, pero si son propuestas minuciosas a los comportamientos observados, que en vista de ser aumentada la campaña experimental lograrían comprobar o desechar dichos análisis.

Tomando en cuenta el análisis de resultados se concluye que:

- La trabajabilidad del hormigón no se ve afectada para cualquiera de las 3 dosificaciones, por lo tanto, la mezcla se comporta de igual manera con las fibras tanto nuevas como reutilizadas.

- En los ensayos a compresión, el mejor desempeño lo obtienen las muestras con dosificación de fibra 100% reutilizada (D3) mostrando un incremento en comparación a las fibras nuevas, y el peor desempeño lo obtienen las muestras con 50% de fibra nueva y 50% fibra reutilizada (D2), atribuyendo esta diferencia a la influencia de la temperatura del ambiente como del hormigón al momento de confeccionar las probetas. Sin embargo, más que verificar el desempeño entre las fibras se logra verificar que las muestras alcanzan el desempeño especificado de 30 MPa, pues para realmente saber si la fibra reutilizada está realizando un aporte en compresión es necesario tener pruebas con hormigones de control (0% fibra y misma dosificación).
- La tenacidad mediante ensayo Barcelona indica que, al comparar muestras con fibras nuevas y reutilizadas, los desempeños de resistencia a la fisuración son levemente menores, mientras que la capacidad de absorción de energía es menor de forma más notoria, llegando incluso alcanzar un 20% menor de capacidad de absorción respecto al desempeño del shotcrete con fibra nueva.
- En la resistencia a la fisuración no se puede ser concluyente respecto a la influencia de la fibra, dado que los valores entre ellos son porcentualmente cercanos en 3 de los 4 casos de comparación, donde se puede estar indicando un comportamiento en que la probeta en su estado no fisurado resiste los esfuerzos de tracción indirecta sin influencia de las fibras y en consecuencia usar una probeta con fibra nueva o reutilizada no afectará el resultado de la carga de fisuración máxima. Este efecto podría notarse de mejor forma en el caso de tener probetas con distintas dosis de fibras y observar los valores de la resistencia a fisuración.
- Con respecto a la capacidad de absorción de energía, la causa principal de este menor desempeño se debe a que varias fibras luego de la fisuración sufren fallas por extracción (pull-out) debido a los residuos que se impregnan en la fibra disminuyendo la adherencia matriz/fibra, impidiendo la deformación en la fibra conforme la evolución de la fisuración, no desarrollando su plena capacidad de resistencia a tracción.
- Las fibras reutilizadas no ven afectada su geometría de largo y ancho, y solo una cantidad de las fibras recuperadas presentan pequeños desgastes en las puntas, por lo tanto, estas condiciones apuntan a que no se afectarían las capacidades resistentes a tracción de las fibras de polipropileno, manteniendo el rango de las fibras originales. Esto hace posible una nueva oportunidad de reutilización en el caso del lavado de un camión mixer con fibra recuperada en su interior.

El análisis de resultados fue también contrastado con las bases de requerimientos de calidad para shotcrete de CODELCO, encontrando que para los 3 ensayos los resultados son competentes dando factibilidad en la reutilización de la fibra recuperada de parte de los estándares de CODELCO. Sin embargo, como los resultados para la capacidad de absorción de energía no se obtienen de forma directa y al tener una campaña experimental limitada, se decide aplicar un factor

de seguridad mayor, condicionando su uso a categorías más bajas como son revestimiento secundario o de sellado además de uso en pavimentos y elementos de estructuras prefabricadas livianas y semi-livianas.

Finalizado las conclusiones respecto al análisis de resultados, se logra el objetivo de aumentar la valorización de este residuo sólido con un potencial de reutilización. El beneficio se extiende tanto a valores económicos como de compromiso medio ambiental. Considerando las cantidades proyectadas del shotcrete para los años 2020-2024, el proceso de reutilización implica recuperar un total de 21.710 kilogramos de fibra de polipropileno⁴, que en la perspectiva de lo monetario y los flujos de dinero que maneja el sector minero en 4 años pasa a ser un aporte marginal. Sin embargo, el aporte de la responsabilidad medioambiental como empresa estatal es muy superior, generando una economía circular acorde a lo propuesto por el Acuerdo de Políticas de Medio Ambiente.

Con respecto al mercado de los fabricantes de fibras de refuerzo, se desea dejar en claro que el poder recuperar las fibras de polipropileno del resto de shotcrete en los camiones mixer debe verse como un potencial aumento de valorización del producto más que un riesgo a sus ventas.

En el caso de querer recuperar fibras de polipropileno del residuo originado por el rebote al aplicarse el shotcrete, se deja propuesto para este caso realizar una futura investigación en que se inspeccione la nueva condición de la fibra, debido a que el acelerante es un químico que modifica las condiciones iniciales presentes en esta investigación.

Adicionalmente, se sugiere poder incorporar la práctica de la recuperación de la fibra como un proceso establecido en las bases de licitación en las nuevas plantas dosificadoras. Además, ante los resultados encontrados para las muestras D2, sería interesante poder extender la campaña experimental que permita identificar el bajo desempeño para la combinación de fibra 50% nueva y 50% reutilizada. Estas nuevas campañas también pueden considerar a su vez porcentajes menores de adición de fibra recuperada (entre 10% al 25%) para disminuir los tiempos de almacenamiento, atendiendo al ritmo de recuperación que tienen.

Por último, hay que recalcar que el éxito de la implementación de esta práctica de reutilización de fibra Barchip también abre la posibilidad de generar que otras divisiones de CODELCO puedan considerar extender esta práctica en sus faenas y posiblemente también en otro tipo de hormigones.

⁴ Valor calculado a partir de la estimación de recuperación de fibra en Figura 2.9 (por cada 6 m³ de hormigón se recupera 0,5 kg de fibra de polipropileno) y la cantidad total de shotcrete en Tabla 2.1 (correspondiente a un total de 260.521 m³ de hormigón entre 2020-2024). Por lo tanto, $(260.521/6) \times 0,5 = 21.710$ kg de fibra de polipropileno.

Capítulo 7

Bibliografía

- Abbas, A., Mtasher, R., & Ne'ma, N. (2011). Strength prediction of Polypropylene fiber Reinforced Concrete. *Engineering and Technology Journal*, 305- 311.
- ACI. (2015). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario*. Farmington Hills, USA: Concrete International.
- ACI. (2018). En *ACI Concrete Terminology* (pág. 61). Farmington Hills, USA.
- Acosta Barriga, F. (2019). *La forma en que vivimos: El ser humano, su ruptura con el medio y consigo mismo*. Santiago: Caligrama.
- Aire, C. (2016). *Métodos de prueba para evaluar el desempeño del concreto reforzado con fibras en estado plástico y endurecido*. Ciudad de México, México: Instituto de Ingeniería UNAM.
- Aire, C. (2018). *Ensayos de control de calidad de hormigón reforzado con fibras en túneles: Experiencia mexicana*. Valencia, España: Editorial Universitat Politecnica de Valencia.
- Alani, A., & Beckett, D. (2013). Mechanical properties of a large scale synthetic fibre reinforced concrete ground slab. *Construction and Building Materials*, 335-344.
- Alhozaimy, A. M., Mirza, F., & Soroushian, P. (1996). Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete and the Effects of Pozzolanic Materials. *Cement & Concrete Composites*, 85-92.
- Astaldi. (2018). *Informe pruebas de aptitud en condiciones de obra con aridos Baeza y Aditivos Sika*. Chile.
- Bracamontes, R. (2014). Concreto lanzado: en la industria minera. *RevistaCyT*, 19-23.
- Carmona, S., & Espinoza, V. (2017). *Equivalencia entre ensayo de panel EFNARC y el ensayo de tracción indirecta por doble punzonamiento. (Tesis de pregrado)*. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaiso, Chile.
- Carmona, S., Aguado de Cea, A., Molins, C., & Cabrera, M. (2009). Control de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras usando el ensayo de doble punzonamiento (ensayo barcelona). *Revista Ingeniería de Construcción*, 119-140.
- Cengiz, O., & Turanlı, L. (2004). Comparative evaluation of steel mesh, steel fibre and high-performance polypropylene fibre reinforced shotcrete in panel test. *Cement and Concrete Research*, 1357–1364.
- Choudhary, M., & Aggarwal, V. (2016). Polypropylene Fiber Reinforced Fly Ash Concrete – A Literature Review. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 2016-2025.

- Cifuentes, H., & Medina, F. (2007). Hormigón reforzado con fibra de polipropileno. Influencia de la ductilidad de la fibra sobre la fragilidad y el efecto tamaño. *Anales de la Mecánica de Fractura*, 215-220.
- Cifuentes, H., García, F., Maeso, O., & Medina, F. (2013). Influence of the properties of polypropylene fibres on the fracture behaviour of low-, normal- and high-strength FRC. *Construction and Building Materials*, 130-137.
- CODELCO. (2018). *Reporte de sustentabilidad 2018*. Santiago.
- CODELCO. (2019). *Requisitos de control de calidad para shotcrete de fortificación*. Vicepresidencia de proyectos, Santiago, Chile.
- Construcción Minera. (1 de Junio de 2018). *Fibras para hormigón: Productividad desde la mezcla*. Obtenido de construccionminera: <https://www.construccionminera.cl/fibras-para-hormigon-productividad-desde-la-mezcla/#.XXXECewn69c>
- CTES. (2015). *Guía de materiales y productos para túneles y espacios subterráneos*. Santiago, Chile: Cámara Chilena de la Construcción.
- Escenario Hídrico 2030 - EH2030. (2018). *Radriografía del Agua: Brecha y Riesgo Hídrico en Chile*. Fundación Chile, Santiago. Obtenido de www.escenarioshidricos.cl/multimedia
- García Guzman, S. (15 de Octubre de 2019). Antecedentes respecto al shotcrete del proyecto PMCHS. (E. Rivera Aránguiz, Entrevistador)
- Gettu, R., & Gopalaratnam, V. (1995). On the Characterization of Flexural Toughness in Fiber Reinforced Concrete. *International Journal Cement and Concrete Composites*, 239-254.
- Grzymiski, F., Musiał, M., & Trapko, T. (2019). Mechanical properties of fibre reinforced concrete with recycled fibres. *Construction and Building Materials*, 323-331.
- Hidalgo Yañez, Y. (2017). *Evaluación de parámetros incidentes en la respuesta post agrietamiento del hormigón proyectado reforzado con fibras de polipropileno. (Tesis de pregrado)*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- ICH. (2015). *Shotcrete - Guía Chilena del Hormigón Proyectado*. Santiago: Instituto del cemento y del hormigón de Chile.
- International Copper Association. (4 de Abril de 2018). *El impacto socioeconómico de la minería del cobre en Chile*. Obtenido de procobre: <https://www.procobre.org/es/wp-content/uploads/sites/2/2018/04/ica-summary-document-el-impacto-de-la-mineria-del-cobre-en-chile-vf-04.04.2018.pdf>
- Karihaloo, B. (1995). *Fracture mechanics and structural concrete*. USA: Longman Scientific and Technical Publishers.
- Kim, D., Naaman, A., & El-Tawil, S. (2008). Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cement & Concrete Composites*, 917–928.
- MarketsandMarkets. (15 de Septiembre de 2016). *Shotcrete/Sprayed Concrete Market worth 8.30 Billion USD by 2021*. Obtenido de marketsandmarkets: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/sprayed-shotcrete.asp>
- Melbye, T. (2010). *Shotcrete para el soporte de rocas*. Zurich.
- Mendoza, C. J., Aire, C., & Dávila, P. (2011). Influencia de las fibras de polipropileno en las propiedades del concreto en estados plástico y endurecido. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 35-47.

- Mendoza, J., Vásquez, A., & Villa, M. (2012). *Análisis del esfuerzo residual en concreto para pavimento rígido reforzado con fibras metálicas y sintéticas. (Tesis de pregrado)*. Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.
- Moreira de Alencar, V., Reis, L., & Silva, F. (2018). On the mechanical behavior of polypropylene, steel and hybrid fiber reinforced self consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 280–291.
- Nazar, F. (2016). *Evaluación analítico-experimental del uso de fibra de polipropileno y acero como refuerzo en sostenimientos de hormigón proyectado para túneles interestación del metro de Santiago. (Tesis de pregrado)*. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- NCh1018. (2009). *Hormigón - Preparación de mezclas para ensayos en laboratorio*. Santiago, Chile.
- NCh1019. (2009). *Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams*. Santiago, Chile.
- NCh1037. (2009). *Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas*. Santiago, Chile.
- Putzmeister. (20 de Julio de 2015). *¿Qué es el Shotcrete? [infografía]*. Obtenido de bestsupportunderground: <http://bestsupportunderground.com/que-es-el-shotcrete/>
- Putzmeister. (17 de Febrero de 2016). *Shotcrete reforzado con fibras: Manual básico*. Obtenido de bestsupportunderground: <http://bestsupportunderground.com/shotcrete-reforzado-con-fibras/>
- Qin, Y., Zhang, X., Chai, J., Xu, Z., & Li, S. (2019). Experimental study of compressive behavior of polypropylene-fiber-reinforced and polypropylene-fiber-fabric-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 216-225.
- Rasul, M., Ahmad, S., Kolawole Adekunle, S., Al-Dulaijan, S., Maslehuddin, M., & Imran Ali, S. (2019). Evaluation of the Effect of Exposure Duration and Fiber Content on the Mechanical Properties of Polypropylene Fiber-Reinforced UHPC Exposed to Sustained Elevated Temperature. *Journal of Testing and Evaluation*.
- Sadiqul Islam, G., & Das Gupta, S. (2016). Evaluating plastic shrinkage and permeability of polypropylene fiber reinforced concrete. *International Journal of Sustainable Built Environment*.
- Segura, S. (2013). *Determinación de la energía de fractura para concreto reforzado con fibras cortas de acero. (Tesis de magister)*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia.
- Singh, V. (2014). Effect of Polypropylene Fiber on Properties of Concrete. *International Journals of Engineering Sciences and Research Technology*, 312-317.
- Tenorio Rojas, J. G. (2016). *Propuesta de criterios de aceptación o rechazo de testigos de hormigón proyectado utilizado en fortificación de túneles mineros y civiles (Tesis de pregrado)*. Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile.
- Thirumurugan, S., & Sivakumar, A. (2013). Compressive Strength Index of Crimped Polypropylene Fibers in High Strength Cementitious Matrix. *World Applied Sciences Journal*, 698-702.
- UNE83515:2010. (2010). *Hormigones con fibras. Determinación de la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción. Método Barcelona*. Madrid, España: AENOR.
- Zabaleta, H. (1989). Situación de los hormigones de alta resistencia en Chile. *Revista Ingeniería de Construcción*.

Zollo, R. (1996). Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, 107-122.

Capítulo 8

Anexos

8.1. Plan maestro de sustentabilidad – Política Corporativa de sustentabilidad



**POLÍTICA CORPORATIVA
DE SUSTENTABILIDAD**
CODELCO – CHILE

Codelco se compromete a producir de manera competitiva y rentable para Chile, minimizando sus riesgos socio ambientales, mitigando sus impactos y generando las condiciones para operar en el largo plazo. Para ello adopta los mejores estándares y busca anticipar la mirada del mercado y de la sociedad para el desarrollo del negocio minero, con el compromiso de una organización motivada, inclusiva y dialogante y con una gestión eficiente, transparente e innovadora.

La Corporación asume estos desafíos como oportunidades para crear valor económico y reputacional como empresa del Estado de Chile, respetando los derechos fundamentales de las personas en su relación con los trabajadores, comunidades, pueblos originarios, grupos de interés y la sociedad en su conjunto.

Esta política aplica a todas las actividades de Codelco y mediante ella la empresa se compromete a:

- 1 CONSOLIDAR UNA CULTURA PREVENTIVA**

Proteger la vida e integridad de las personas, la continuidad de marcha de sus procesos y el cuidado de los recursos confiados a su administración, generando una cultura preventiva en la toma de decisiones y en las conductas para obtener un ambiente de trabajo con riesgos controlados.
- 2 CUIDAR EL MEDIO AMBIENTE**

Gestionar de manera preventiva y transparente los riesgos medioambientales, cumpliendo la normativa, considerando los efectos del cambio climático, aumentando la eficiencia hídrica y energética, disminuyendo el consumo de agua continental y la emisión de gases y material particulado.
- 3 ESTABLECER RELACIONES DE CONFIANZA**

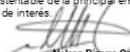
Generar relaciones de entendimiento mutuo y colaboración entre la empresa y las comunidades con las que interactúa para abordar los desafíos compartidos, respetando la cultura, costumbres y valores locales, propendiendo al bienestar integral de los habitantes y contribuyendo al desarrollo de las potencialidades de los territorios en los que desarrolla sus actividades, así como también con sus proveedores y grupos de interés de la sociedad.
- 4 DESARROLLAR EL MEJOR CASO DE NEGOCIO**

Transformar los recursos minerales de Codelco en riquezas para Chile a través de un plan integral que materialice el mejor caso de negocio, incorpore la gestión sistemática de los riesgos e estratégicos y asegure una cultura de cumplimiento de los compromisos y de las normas aplicables a su actividad, con el adecuado seguimiento de su gobierno corporativo, con transparencia y de acuerdo a los Principios Rectores de Naciones Unidas sobre las Empresas y los Derechos Humanos.
- 5 LIDERAR LA ORGANIZACIÓN DESDE LA DIVERSIDAD**

Desarrollar una conducta organizacional basada en el cumplimiento de la ley y de los valores de la Corporación, que fortalezca el liderazgo ético y motivador, para afrontar los desafíos del negocio en un contexto social y laboral cambiante, junto con la promoción de la diversidad, la equidad de género y la participación de mujeres en los distintos estamentos de la Corporación.
- 6 INNOVAR PARA CREAR FUTURO**

Potenciar un plan de innovación estratégica que favorezca el desarrollo y la incorporación de tecnología en los procesos y sistemas de gestión, junto a la diversificación de la producción, contribuyendo así a un mejor desempeño económico, social y ambiental.

Mediante esta Política Corporativa, Codelco se hace cargo del desarrollo sustentable de la principal empresa de Chile, con pleno respeto por las personas, comunidades y demás grupos de interés.


Nelson Pizarro Cortázar
 Presidente Ejecutivo - CODELCO Chile


 Diciembre 2016



8.2. Ficha técnica Barchip54



Nombre del Producto:

BarChip⁵⁴

Descripción

La fibra sintética estructural Barchip54 está en el rango de fibras sintéticas estructurales que ofrece Elasto Plastic Concrete como resultado de su Programa de investigación y desarrollo, Fibra Futura. El objetivo de este programa es desarrollar una variedad de fibras que logren los mejores niveles de rendimiento en distintas aplicaciones. Se han incorporado los últimos avances en la tecnología de polímeros, ingeniería de diseño y procesos de fabricación en la fibra Barchip54 para entregar una fibra inigualable en términos de uso, durabilidad y rendimiento. Barchip54 ha sido optimizada para estructuras de hormigón con una resistencia a la compresión mayor que 300 kg/cm².

Vista de cerca de la fibra



Propiedades

Resina	Olefina modificada
Largo	54 mm
Resistencia a la tracción	6400 kg/cm ²
Superficie	Relieve continuo
Cantidad de fibra	37 000 fibras / kg
Densidad Relativa	0,90 - 0,92
Módulo de Elasticidad	10 GPa
Punto de fusión	159 - 179 C
Punto de Ignición	Sobre 450 C

Beneficios

- Reducción de costos en términos de la absorción de energía requerida.
- Durabilidad a largo plazo sin oxidación.
- Entregado en la obra como hormigón pre-reforzado (HPR).
- Sin la necesidad de cortar e instalar malla, por ende aumenta la eficiencia y productividad.
- Más liviana y segura para maniobrar comparado con acero.
- Reducción de exfoliación durante incendios.
- Menos desgaste en bombas, mangueras y boquillas.

Dosis

La dosis de Barchip54 puede variar desde 3,0 kg/m³ hasta 10,0 kg/m³. Se calcula la dosis en base a la exigencia de la aplicación o las especificaciones técnicas. Para condiciones geotécnicas normales la dosis típica es entre 3 y 6 kg/m³. Se puede calcular la dosis exacta en base a las condiciones geotécnicas (RMR o Sistema-Q) o en base a la equivalencia de otros refuerzos. Para asistencia técnica en cálculos de dosis, favor de contactarse con los ingenieros de EPC.

Mezclado

Para lograr una distribución óptima de fibra, se recomienda proporcionar toda la fibra requerida en su envase sellado, al agua inicial de aproximadamente 20 a 50 litros. Desde luego se puede proceder con el proceso normal de mezclado. Los sacos se deshacen y las fibras se auto-distribuyen dentro del hormigón. Al proporcionar 5 kg/m³ de fibra a la mezcla, el cono podría bajar entre 1 a 5 cm, dependiendo de las características del hormigón. Es recomendable medir el cono final y ajustarlo si fuese necesario. Además, se recomienda imperativamente que el ajuste se haga con super plastificante o un reductor de agua y no con la adición simple de agua, para así no reducir la resistencia final del hormigón al aumentar la razón agua:cemento.

Un buen mezclado del hormigón depende mucho de la eficiencia del huevo y generalmente este debería seguir girando por un mínimo de cinco minutos para lograr una mezcla homogénea. Para instrucciones más detalladas, solicite la Guía de Dosificación y Mezclado de EPC.

Bombeo

Se puede bombear la fibra Barchip54 a través de mangueras con un diámetro mínimo de 50mm. Es necesario prestar atención a la separación de las barras de la parrilla en el buzón para asegurar que las fibras pasen libremente.

Manejo y Almacenaje



- Sacos de 3 o 5 kg en papel degradable
- Bolsas a granel



Almacenaje: Protegerse de los efectos del tiempo
Seguridad: Ver MSDS.

Hoja Técnica

- Sacos degradables de 3,0 o 5,0 kg c/u y pallets de 432 o 390 kg/pallet.
- Olefina resistente a luz solar UV.
- Pallet de plástico durable.
- Carpa de protección en cada pallet.
- Big bags disponibles para dosificadora automática o proyectos especiales.

Se suministra la fibra cubierta con una carpa, sobre un pallet de plástico durable que permite almacenarla a la intemperie sin ninguna deterioración del producto ni su empaquetadura. El almacenaje de sacos individuales requiere protección. Para mayor información, ver Hoja de Seguridad que se encuentra en www.elastoplastic.com.

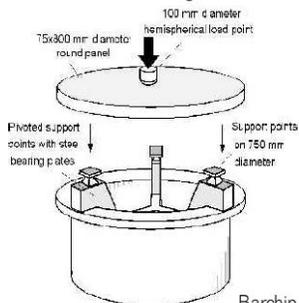
Barchip54 es apta para uso en:

- Caminos ■ Veredas ■ Prefabricado ■ Shotcrete
- Pisos industriales ■ Radieres ■ Muros ■ Viviendas

Ensayos **ASTM C-1550 (Panel Circular)**

Este ensayo entrega a los calculistas, ingenieros, contratistas y mandantes, varias ventajas comparadas con ensayos alternativos como el Efnarc, ASTM C-1018, ASTM C-1609 y JSCE SF-4. Ventajas incluyen la baja variabilidad entre resultados, la eliminación de la necesidad de cortar el panel con una sierra de diamante, el costo menor del ensayo y la rapidez de preparación de los paneles. Como consecuencia el ensayo ASTM C-1550 es ideal para el control de calidad antes de la puesta en marcha y también durante el transcurso de un proyecto. Otros ensayos más costosos y lentos, como el Efnarc, se han usado únicamente para definir la mezcla y aprobar los materiales antes de la puesta en marcha de un proyecto. Por lo tanto tales ensayos quedarán obsoletos.

“Ver con nuestros ingenieros en EPC”.



Barchip is manufactured in accordance with ISO 9001 standards.

Esta información ha sido divulgada sólo como guía de ejecución, para condiciones específicas y supervisadas. Se recomienda que el usuario realice sus propias evaluaciones y consulte profesionales para determinar si el producto es adecuado para cualquier tipo de proyecto o utilización, antes de hacer uso comercial.



América Latina **Tel: +56 32 271 5118**
 Norte América Tel: +1 704 843 8401
 Europa Tel: +44 (0) 77 8070 2642
 Australia Tel: +61 1300 131 158
 Asia Tel: +65 6835 7716

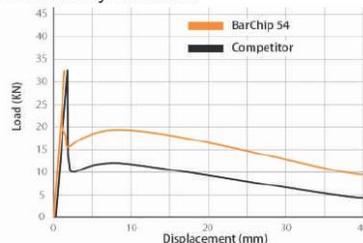
sa@elastoplastic.com
 na@elastoplastic.com
 europe@elastoplastic.com
 australia@elastoplastic.com
 asia@elastoplastic.com

Más información disponible sobre ensayos de:

- Resistencia contra incendio (anti-exfoliación).
- Ensayos avanzados de alcalinidad.
- Durabilidad a largo plazo.

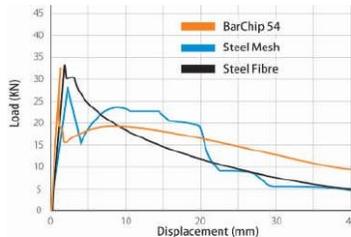
Resultados

Ensayos realizados a Barchip54 junto con varias otras fibras sintéticas y metálicas.



Refuerzo	Dosis (kg/m ³)	ASTM C-1550 (Joules)	Efnarc (Joules)
Barchip54	5,0	470	1175
Comp. 58 mm	5,0	362	905

(Resultado promedio con cinco paneles circulares)



Refuerzo	Dosis (kg/m ³)	ASTM C-1550 (Joules)	Efnarc (Joules)
Barchip54	5,0	470	1175
Malla F41		475	1187
Fibra Metálica	30	444	1110

(Resultado promedio con cinco paneles circulares)



8.3. Fichas técnicas de cemento Melón Extra y Polpaico P400

FICHA DE PRODUCTO
EXTRA



EXTRA EL MÁXIMO DESEMPEÑO EN CONSTRUCCIÓN

Aplicaciones

Especialmente formulado para la confección de hormigones que requieran alta resistencia inicial. Para hormigones con resistencia especificada a 28 días, correspondiente al grado H40 y superiores, También tiene un excelente desempeño para aplicaciones de hormigón proyectado.

- Edificación en altura con desmolde temprano (14 horas).
- Pavimentos de rápida apertura al tránsito (24 horas o menos).
- Elementos prefabricados pretensados.
- Elementos prefabricados estructurales.
- Shotcrete de resistencia especificada superior a H35.
*Shotcrete con requisito de resistencia temprana (Curvas J).
- Lechadas para anclaje de pernos.

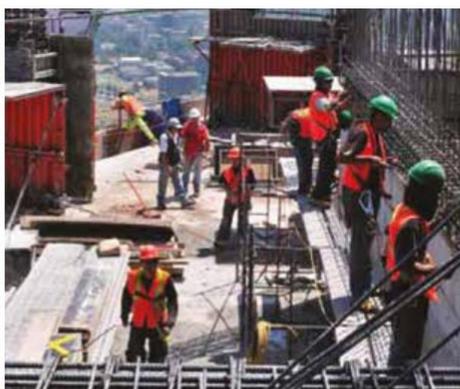
Beneficios

- **Melón Extra** a diferencia de cualquier otro cemento del mercado, presenta el más rápido desarrollo de resistencia, fundamentalmente dentro de las primeras 24 horas, aun en climas fríos.
- En aplicaciones normales, no requiere aditivos aceleradores y en caso de aplicar ciclo de vapor, la temperatura no necesita ser mayor a 50° C.
- A los hormigones les confiere una excelente protección frente a los agentes agresivos normales (sulfatos, agua de mar).
- Sus finas partículas contribuyen a lograr un hormigón más cohesivo y trabajable, lo que se traduce en mejores terminaciones superficiales y en un mínimo rebote en hormigón proyectado (shotcrete).





19 de Enero de 2016
Melón se reserva el derecho de modificar el contenido de esta publicación sin previo aviso.



Características

Melón Extra es un cemento formulado a base de clínker, puzolana y yeso, dosificados de manera precisa y controlada en proceso de molienda conjunta, obteniendo un producto de calidad estable y mínima variabilidad.

Clasificación

- Según norma NCh148.Of68 Clase Portland Pozolánico, Grado Alta Resistencia.
- Según norma ASTM C595: Tipo IP (Cemento Portland-Puzolánico)
- Según norma ASTM C1157: Tipo HS (Alta resistencia a los sulfatos)

INFORMACIÓN TÉCNICA

Variable de control	Melón Extra	Requerimiento NCh148.Of68
Fraguado Inicial (minutos)	90	> 45
Fraguado Final (minutos)	125	< 600
Superficie específica Blaine (cm ² /gr)	5000	-
Peso específico (gr/dm ³)	3,00	-
Resistencia a compresión (kg/cm²)		
7 días	420	> 250
28 días	500	> 350
Resistencia a flexotracción (kg/cm²)		
7 días	65	> 45
28 días	75	> 55
Pérdida por calcinación (%)	2,0	< 4,0
Residuo insoluble (%)	12,0	< 30
Contenido de SO ₃ (%)	3,5	< 4,0

Recomendaciones

Elementos de protección personal: durante la manipulación del cemento, se deben utilizar los elementos de protección personal. Se debe evitar el contacto con la piel, ojos y su inhalación.

Almacenamiento: en sacos dispuestos en bodegas, se prefieren los recintos ventilados para evitar la acumulación de humedad. Se recomienda no apilar más de 12 sacos para evitar su compactación.

Manipulación: siempre se deben utilizar Equipos de Protección Personal. Se debe manipular el cemento en recintos ventilados. Se debe evitar el vertido brusco que provoque dispersión del polvo de cemento en el ambiente.

Duración: se recomienda la utilización del cemento antes de dos meses desde fecha de envasado, siempre que se sigan condiciones aceptables de almacenamiento. En invierno, se recomienda no almacenar cemento por más de un mes.

Dosificación: se debe dosificar según la resistencia deseada, la dosis mínima requerida y la razón agua / cemento.

Mezclado: el mezclado del cemento con los demás materiales en un hormigón o mortero se debe llevar a cabo de preferencia en hormigonera mecánica para asegurar una correcta homogeneización.

Para mayor información del producto, contactarse con:

Contacto | asesores.tecnicos@melon.cl



MELÓN RECOMIENDA UTILIZAR ELEMENTOS DE PROTECCIÓN PERSONAL EN LA COLOCACIÓN DE HORMIGÓN.

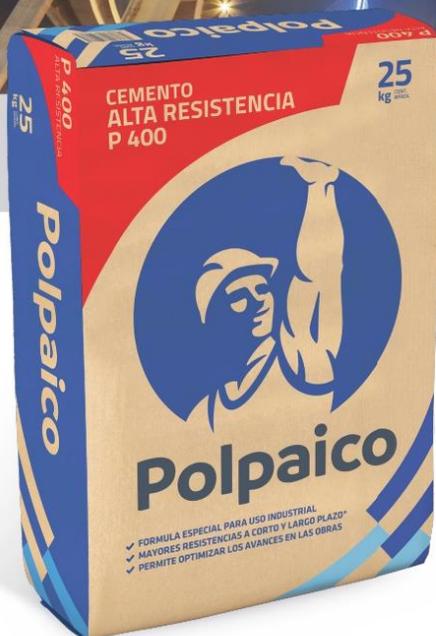
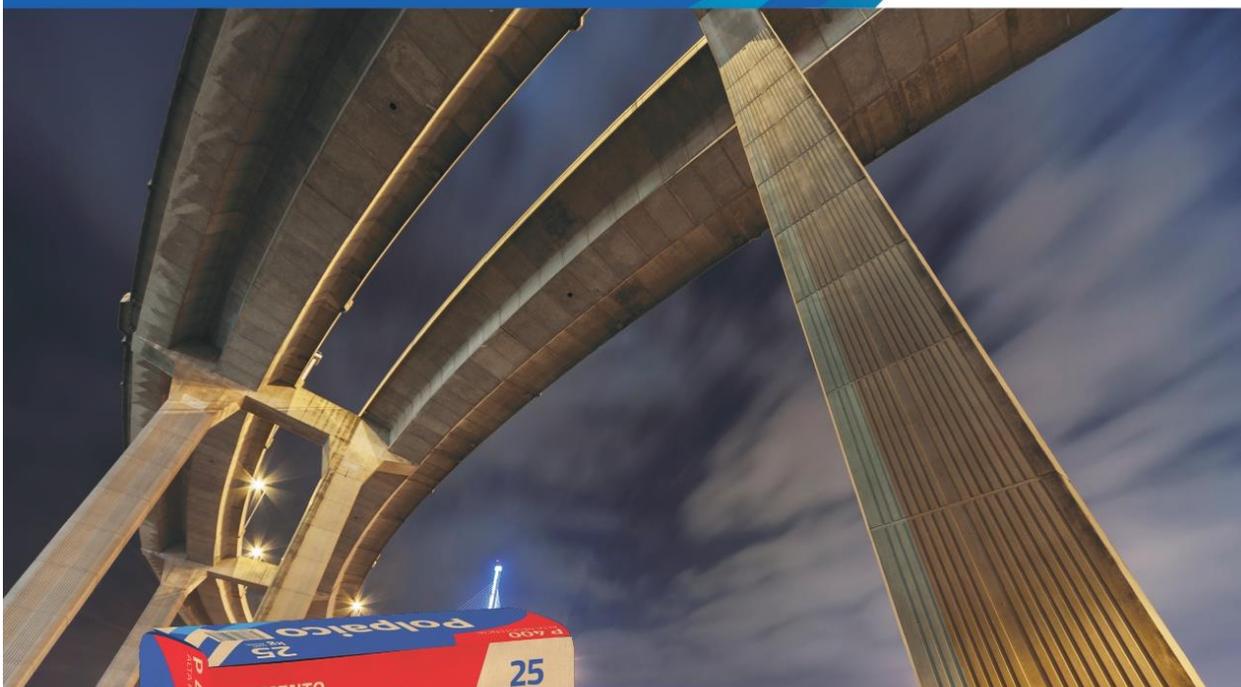
www.melon.cl

melon
CEMENTOS

CEMENTOS

CEMENTO P400

ALTA RESISTENCIA



Sacos de

25 kgs.

BigBags de

1 Ton.

Granel en camión

El Cemento Polpaico 400 es un cemento grado alta resistencia, que se fabrica bajo la norma chilena NCh 148.0f68 mediante la molienda conjunta de clínquer, yeso y materiales puzolánicos.

El cemento Polpaico 400 puede comercializarse en:

- ✓ Sacos de 25 kg.
- ✓ Granel en camión.
- ✓ Big Bags de 1 ton.

Para una óptima mezcla considere:

Para un mayor aprovechamiento de las cualidades del Cemento P400 en la confección de hormigones y morteros sugerimos:



1 PREPARAR

Use la cantidad requerida de Cemento P400. Utilice de preferencia sacos completos o medios sacos.



2 UTILIZAR

Use Áridos limpios y con un tamaño adecuado a la aplicación. Acópielos sobre una base compactada, separando los distintos tipos. Use agua potable y ajuste la cantidad de esta, hasta obtener un hormigón o mortero con la consistencia definida.



3 DOSIFICAR

Según la resistencia especificada y la dosificación definida, mida los materiales, preferentemente en peso o usando volúmenes conocidos como carretillas dosificadoras o baldes calibrados.



4 MEZCLAR

Mezcle en betonera hasta obtener un mortero u hormigón homogéneo con la consistencia definida, sin que se separen los materiales. Compacte la mezcla para llenar completamente los moldes y lograr mejores terminaciones. De preferencia use vibradores de inmersión.



5 HUMEDECER

Humedezca el hormigón o mortero por lo menos siete días.

Tablas técnicas:

Además de un riguroso autocontrol de producción, el cemento Polpaico 400 es muestreado y controlado en cada Planta por un laboratorio oficial acreditado. En la tabla se muestra las especificaciones de la norma NCh 148.Of68 y los resultados límites del control realizado por el Laboratorio Oficial en un año.

REQUISITOS NCh148.Of68			
Clase	Portland Puzolánico	Puzolánico	CEMENTO POLPAICO 400
Grado	Alta Resistencia	Alta Resistencia	
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS Y FÍSICAS			
Expansión en autoclave, % máx.	1,00	1,00	0,24
Pérdida por calcinación, % máx.	4,0	5,0	3,1
Residuo insoluble, % máx.	30,0	50,0	19,8
Contenido de SO ₃ , % máx.	4,0	4,0	2,84
Tiempos de fraguado (Vicat)			
Inicial, h:min, mín.	00:45	00:45	01:40
Final h:min, máx.	10:00	10:00	04:30
CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS			
Resistencia a la compresión			
7 días, kgf/cm ² , mín.	250	250	323
28 días, kgf/cm ² , mín.	350	350	449
Resistencia a la flexión			
7 días, kgf/cm ² , mín.	45	45	48
28 días, kgf/cm ² , mín.	55	55	63

✓ Aplicaciones

- Construcción general donde se requieren altas resistencias, como edificación en altura y obras industriales.
- Obras con grandes masas de hormigón.
- Prefabricados de alta resistencia como pretensados para vigas de puente y edificios.
- Prefabricados como bloques, tubos, baldosas, adoquines, soleras, otros.
- Sistemas constructivos con desmolde a corto plazo.
- Ideal para inyecciones en rocas, suelos y ductos de postensados.
- Shotcrete para túneles, canales y taludes.
- Lechadas de inyecciones y morteros predosificados.
- Obras mineras e industriales donde se requiera altas resistencias y durabilidad.
- Estructuras impermeables y subterráneas.
- Pavimentos y pisos industriales.

✓ Ventajas

- Mayores resistencias a corto y largo plazo.
- En hormigones permite obtener las resistencias especificadas con menores dosis de cemento que al usar cementos corrientes.
- Su composición minimiza la aparición de eflorescencias en distintas mezclas confeccionadas con este cemento.
- Permite optimizar los avances de obras especialmente en la etapa de obra gruesa.
- Alta compatibilidad con el uso de aditivos de uso general y aplicaciones especiales.

✓ Recomendaciones de uso

- Use primero los sacos más antiguos y luego los más nuevos, lo que le ayudará al consumo del cemento siempre fresco.
- Evite el movimiento excesivo de los sacos y cuide el traslado de los pallets sobre grúa, para así disminuir las roturas.
- Tome en consideración las condiciones ambientales en que se trabajará (temperatura y humedad).
- En la confección de hormigones y morteros, use la cantidad requerida de cemento Polpaico mediante el uso de sacos completos o medios sacos.
- Los áridos deben estar limpios y tener un tamaño adecuado a la aplicación. Acópielos sobre una base compactada, separando los distintos tipos.
- Use agua potable y ajuste la cantidad de esta, hasta obtener un hormigón o mortero con la consistencia definida.
- Según la resistencia especificada y la dosificación definida, mida los materiales, preferentemente en peso o usando volúmenes conocidos como carretillas dosificadoras o baldes calibrados.
- Mezcle en betonera hasta obtener un mortero u hormigón homogéneo con la consistencia definida, sin que se separen los materiales.
- Compacte la mezcla para llenar completamente los moldes y lograr mejores terminaciones. • Preferentemente use vibradores de inmersión.
- Humedezca el hormigón o mortero por lo menos 7 días
- Se recomienda manipular el cemento en ambientes ventilados, evitando la inhalación prolongado del producto.
- Al utilizarlo cubra su cuerpo con guantes y ropa de trabajo, evitando el contacto reiterado y prolongado con el cemento humedecido. En caso de contacto con la piel, lavar con agua y jabón. Si se produce contacto accidental de cemento con los ojos, lavar con abundante agua limpia.

Polpaico

Cemento Polpaico S.A. posee una amplia cobertura a lo largo de Chile, ofreciendo productos y servicios integrales para satisfacer los requerimientos de sus clientes, a través de soluciones de alta calidad y asistencia técnica. Consulte a nuestros ejecutivos por su proyecto al **600 620 6200**.

Síguenos en:



Todos los tipos de cemento fabricados por Cemento Polpaico S.A. cumplen con las especificaciones de la norma chilena, verificado por laboratorios externos de certificación.

Fecha emisión **noviembre 2017**. Esta versión reemplaza y anula las versiones anteriores.

8.5. Resultado de ensayo a compresión para las 9 probetas ensayadas

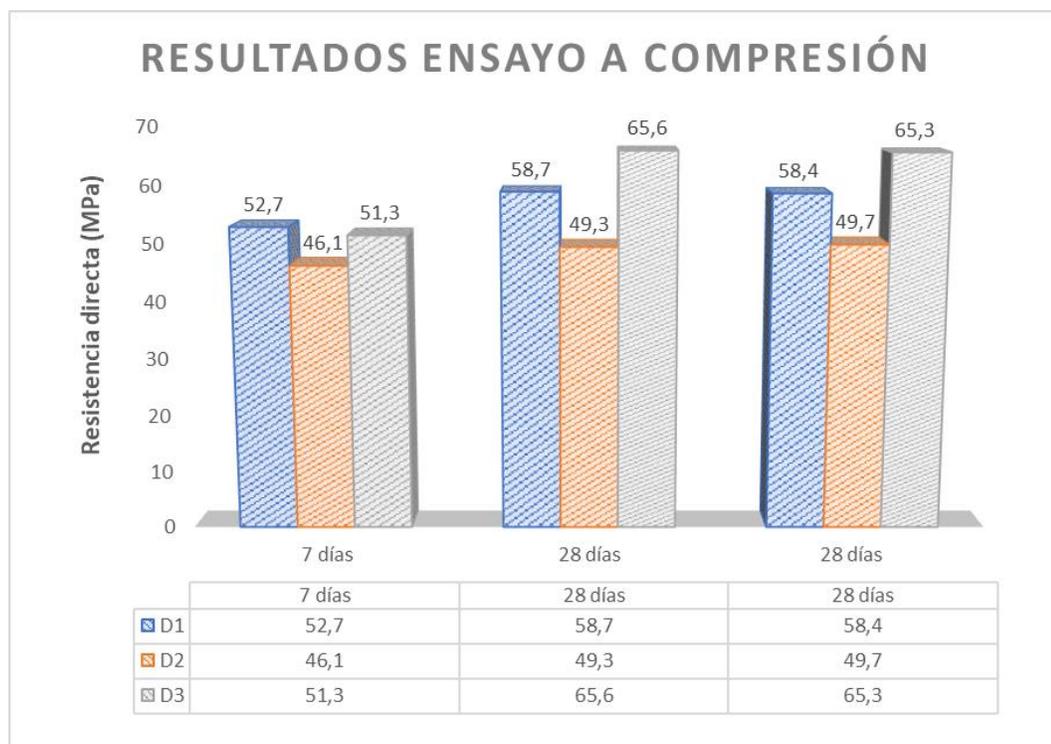


Figura 8.1: Gráfico y tabla de resultados de ensayo a compresión NCh1037:2009

8.6. Información complementaria de probetas D1, D2 y D3

Tabla 8.1: Registro de probetas D1 de ensayo

Registro de ensayo a compresión D1 (7d; 28d; 28d)				
Probetas	d (mm)	h (mm)	Masa (kg)	Segregación
D1-7d	151	300	12,62	No
D1-28d	151	300	12,53	No
D1-28d	151	300	12,49	No
Probetas	Porosidad	Carga Max corregida (N)	Resistencia Directa (MPa)	Rotura correcta
D1-7d	Si	942373	52,70	Si
D1-28d	Si	1042953	58,70	Si
D1-28d	Si	1037629	58,40	Si

Fuente: Informe de registro de ensayo D1 Laboratorio Geholab

Tabla 8.2: Registro de probetas D2 de ensayo

Registro de ensayo a compresión D2 (7d; 28d; 28d)				
Probetas	d (mm)	h (mm)	Masa (kg)	Segregación
D2-7d	150	300	12,34	No
D2-28d	151	300	12,52	No
D2-28d	151	300	12,40	No
Probetas	Porosidad	Carga Max corregida (N)	Resistencia Directa (MPa)	Rotura correcta
D2-7d	Si	813099	46,10	Si
D2-28d	Si	875708	49,30	Si
D2-28d	Si	883133	49,70	Si

Fuente: Informe de registro de ensayo D2 Laboratorio Geholab

Tabla 8.3: Registro de probetas D3 de ensayo

Registro de ensayo a compresión D3 (7d; 28d; 28d)				
Probetas	d (mm)	h (mm)	Masa (kg)	Segregación
D3-7d	151	301	12,65	No
D3-28d	151	301	12,68	No
D3-28d	151	301	12,66	No
Probetas	Porosidad	Carga Max corregida (N)	Resistencia Directa (MPa)	Rotura correcta
D3-7d	Si	911541	51,30	Si
D3-28d	Si	1165757	65,60	Si
D3-28d	Si	1159839	65,30	Si

Fuente: Informe de registro de ensayo D3 Laboratorio Geholab

8.7. Registros fotográficos de planta de dosificación y piscina de lavado



Figura 8.2: Vista amplia de planta de dosificación de PMCHS



Figura 8.3: Segunda vista de planta de dosificación de PMCHS



Figura 8.4: Incorporación de fibra de polipropileno a la planta dosificadora



Figura 8.5: Piscina de lavado de descarga de camión mixer



Figura 8.6: Piscina de lavado con presencia de árido



Figura 8.7: Piscina de lavado vacía



Figura 8.8: Vista completa de la piscina de lavado