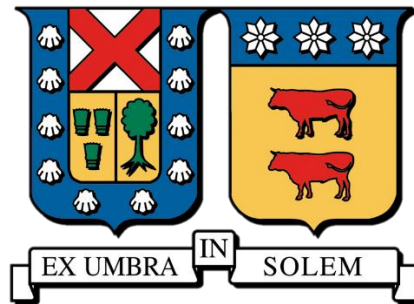


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y DE MATERIALES

SANTIAGO – CHILE



ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL HORMIGÓN
PROYECTADO O SHOTCRETE CON FIBRA VEGETAL DE YUTE Y FIBRAS DE
ACERO ANTE ESFUERZOS COMPRESIVOS

Memoria para optar al título de
INGENIERO CIVIL DE MINAS

ARIEL IGNACIO PEÑA ENCALADA

Profesor Guía – René Gómez

Profesor Co-Referente – Adeline Delonca

Noviembre 2023



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

RESUMEN

El uso de Shotcrete reforzado con fibras de acero ha demostrado ser efectivo en pruebas de resistencia a la compresión, rigidez y resistencia al post fisuramiento de la roca. Este método no solo mejora las propiedades mecánicas de la mezcla, sino que también aporta ductilidad al Shotcrete, distribuyendo la carga entre el revestimiento y el macizo rocoso. Este enfoque no solo garantiza la resistencia estructural sino también la capacidad de soportar deformaciones en el macizo sin dañar el revestimiento.

En el contexto de una minería que busca un desarrollo sostenible, este documento propone cambios en la composición del Shotcrete, comparando las fibras de acero con fibras vegetales de yute. Se llevan a cabo ensayos mecánicos para diferentes mezclas de hormigón, evaluando muestras sin fibras como referencia y muestras con fibras de acero y yute. Las muestras se someten a curado y se analizan a intervalos de 7, 14 y 28 días, seguido de ensayos de compresión. Las comparaciones se basan en gráficos de carga versus deformación lineal, permitiendo evaluar su comportamiento y determinar la idoneidad de las fibras de yute en comparación con las de acero en el Shotcrete para túneles mineros.

En la evaluación de resultados por días de curado, se busca comparar la resistencia y el módulo de elasticidad de diversas mezclas de hormigón con diferentes tipos y dosificaciones de fibras. En el curado de 7 días, se destaca que la muestra con fibra vegetal del 0.4% exhibe una resistencia a la compresión significativamente mayor que las muestras con fibras de acero, con un aumento del 56.16%. No obstante, al extender el período de curado a 14 días, la resistencia de la muestra con fibra vegetal disminuye y se sitúa por debajo de las muestras con fibras de acero. En el curado de 28 días, se mantiene esta tendencia, y se evidencia que las muestras con fibras de yute tienen una menor resistencia a la compresión después de los 14 días. La comparación directa de la resistencia con el mismo porcentaje de fibras (0.4%) muestra una evolución similar con el tiempo, destacando los máximos valores a los 28 días y revelando que las muestras con fibras de yute presentan una mejora notable en los primeros días de curado.

ABSTRACT

The use of steel fiber-reinforced Shotcrete has proven effective in tests of compressive strength, stiffness, and post-cracking resistance of rock. This method not only enhances the mechanical properties of the mix but also imparts ductility to the Shotcrete, distributing the load between the lining and the rock mass. This approach ensures not only structural strength but also the ability to withstand deformations in the mass without damaging the lining.

In the context of a mining industry striving for sustainable development, this document proposes changes in the composition of Shotcrete, comparing steel fibers with natural jute fibers. Mechanical tests are conducted for different concrete mixtures, evaluating samples without fibers as a reference and samples with steel and jute fibers. The samples undergo curing and are analyzed at intervals of 7, 14, and 28 days, followed by compression tests. Comparisons are based on load versus linear deformation graphs, allowing the assessment of their behavior and determining the suitability of jute fibers compared to steel fibers in Shotcrete for mining tunnels.

In the evaluation of results by days of curing, the aim is to compare the strength and modulus of elasticity of various concrete mixtures with different types and dosages of fibers. In the 7-day curing, it is highlighted that the sample with 0.4% vegetable fiber exhibits significantly higher compressive strength than samples with steel fibers, with an increase of 56.16%. However, extending the curing period to 14 days, the strength of the sample with vegetable fiber decreases and falls below samples with steel fibers. This trend is maintained in the 28-day curing, and it is evident that samples with jute fibers have lower compressive strength after 14 days. The direct comparison of strength with the same percentage of fibers (0.4%) shows a similar evolution over time, highlighting the maximum values at 28 days and revealing that samples with jute fibers show a notable improvement in the early curing days.



INDICE GENERAL

Tabla de contenido

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
INDICE GENERAL	5
INDICE DE IMÁGENES	8
INDICE DE GRAFICOS	10
INDICE DE TABLAS	11
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. ANTECEDENTES GENERALES	12
1.2. OBJETIVOS	14
1.2.1. OBJETIVO GENERAL DEL TRABAJO	14
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL TRABAJO	14
2. MARCO TEÓRICO	14
2.1. HORMIGÓN PROYECTADO	14
2.2. USOS GENERALES DEL HORMIGÓN PROYECTADO	16
2.3. HORMIGÓN PROYECTADO PARA TUNELES MINEROS	17
2.4. HORMIGÓN CON FIBRAS	18
2.4.1. TIPOS DE FIBRAS	18
2.4.2. FIBRAS DE ACERO	21
2.4.3. FIBRA VEGETAL DE YUTE	22
2.4.4. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL SHOTCRETE CON FIBRAS	24
2.5. ENSAYOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN	25
2.5.1. MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN ...	26



2.6. MÓDULO DE YOUNG EN SHOTCRETE CON FIBRAS	27
2.7. ESTUDIOS ANTERIORES	28
2.7.1.APLICACIÓN DE HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE ACERO COMO SOPORTE PRIMARIO PARA TÚNELES EN FLYSCH	28
2.7.2.DESEMPEÑO DEL SOPORTE SUPERFICIAL DEL SHOTCRETE DESPUÉS DE LA CARGA DINÁMICA DE EXCAVACIONES MINERAS	29
2.7.3.ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN Y EL ANCHO DE FISURA PARA HORMIGÓN PROYECTADO REFORZADO CON FIBRAS USADO EN MINAS DE ROCA DÉBIL	30
2.7.4.COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO Y DE CAMPO DE LA APLICACIÓN DE HORMIGÓN PROYECTADO REFORZADO CON FIBRAS	31
3. METODOLOGÍA GENERAL	33
3.1. OBTENCIÓN DE DATOS	34
3.2. MATERIALES Y DOSIFICACIONES	34
3.3. PREPARACIÓN DEL HORMIGÓN	35
3.3.1.NOMENCLATURA DE PROBETAS	36
3.4. CURADO Y SECADO	37
3.5. ENSAYOS DE COMPRESIÓN	38
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	40
4.1. ESPECTROS DE CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN	40
4.2. RESULTADOS POR DÍAS DE CURADO	43
4.2.1.CURADO DE 7 DÍAS	43
4.2.2.CURADO DE 14 DÍAS	44
4.2.3.CURADO DE 28 DÍAS	45
4.3. COMPARACIÓN DIRECTA DE LA RESISTENCIA CON MISMO PORCENTAJE DE FIBRAS (0,4%)	47



4.4. COMPARACIÓN DIRECTA DE LA ELASTICIDAD CON MISMO PORCENTAJE DE FIBRAS (0,4%).....	48
5. CONCLUSIONES	51
5.1. RECOMENDACIONES.....	52
6. ANEXOS.....	54
7. REFERENCIAS	56
8. BIBLIOGRAFÍA.....	58

INDICE DE IMÁGENES

IMAGEN 1: FIBRAS DE DIFERENTES MATERIALES UTILIZADAS PARA VARIADOS USOS EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN. A) FIBRAS DE ACERO, B) FIBRAS DE POLIPROPILENO, C) FIBRAS DE VIDRIO, D) FIBRAS DE CARBONO, E) FIBRAS DE POLIMEROS, F) FIBRAS VEGETALES.....	20
IMAGEN 2: GEOMETRÍA DE LAS FIBRAS. DE IZQUIERDA A DERECHA: DERECHA, FINAL CON GANCHOS, PALETAS, FINAL CON PERILLAS, CONIFICADO, ONDULADO (FORMA DE ONDAS), FORMA DE ARCO, DENTADA, SUPERFICIE DENTADA, IRREGULAR Y RETORCIDA (MÁRMOL, PATRICIA (2010). HORMIGONES CON FIBRAS DE ACERO, CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS).....	22
IMAGEN 3: SECCIONES DE FIBRAS COMUNES. DE IZQUIERDA A DERECHA: CIRCULAR, CUADRADA, RECTANGULAR, TRIANGULAR, ELÍPTICA, HEXAGONAL, OCTAGONAL E IRREGULAR (MÁRMOL, PATRICIA (2010). HORMIGONES CON FIBRAS DE ACERO, CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS).....	22
IMAGEN 4: PROPIEDADES ESPECÍFICAS DE LA FIBRA VEGETAL DE YUTE.....	24
IMAGEN 5: EJEMPLO ILUSTRATIVO DE ENSAYO DE UNA PROBETA CILÍNDRICA Y DETERMINACIÓN DE SUS DIMENSIONES.	26
IMAGEN 6: EJEMPLO ILUSTRATIVO DE ENSAYO DE UNA PROBETA CÚBICA Y DETERMINACIÓN DE SUS DIMENSIONES.	27
IMAGEN 8: AUMENTO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CUBOS Y CILINDROS QUE SUPERA LOS $20 N/mm^2$ EN TIEMPO TEMPRANO (50% DE LA RESISTENCIA PROMEDIO A LOS 110 DÍAS)	29
IMAGEN 9: CARGA FRENTE A DESPLAZAMIENTO DE PANELES REDONDOS DETERMINADOS (RDP) QUE INDICA LA CARGA MÁXIMA DE FLEXIÓN Y LA CARGA RESIDUAL.....	31
IMAGEN 10: CÓDIGOS DE NOMBRES PARA LAS MUESTRAS	32
IMAGEN 11: EFECTO DE LA CANTIDAD DE FIBRAS SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS.	32
IMAGEN 12: A LA IZQUIERDA LOS MOLDES DE MADERA UTILIZADOS PARA EL DEPÓSITO Y SOLIDIFICACIÓN DEL HORMIGÓN. A LA DERECHA LOS MATERIALES PESADOS Y SEPARADOS PARA UNA TIRADA DE HORMIGÓN.....	35
IMAGEN 13: NOMENCLATURA CREADA PARA DIFERENCIAR LAS PROBETAS AL REALIZAR LOS ENSAYOS DE COMPRESIÓN.....	36



IMAGEN 14: NOMENCLATURA DISPUESTA EN LAS PROBETAS PARA UN CURADO DE 14 DÍAS (LETRA B).....	37
IMAGEN 15: RECIPIENTES PLÁSTICOS UTILIZADOS PARA EL CURADO DE LAS PROBETAS DE HORMIGÓN.	38
IMAGEN 16: PRENSA PARA ENSAYOS SERCOMP 7 CONECTADA A UNA CONSOLA ADVANTEST 9 Y COMPROBACIÓN DE PARÁMETROS EN SOFTWARE.....	39
IMAGEN 17: GRÁFICA SUPERIOR DE CARGA VERSUS DEFORMACIÓN ENTREGADA POR EL SOFTWARE DE MANERA INSTANTÁNEA A MEDIDA QUE SE REALIZA UN ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	39
IMAGEN 18: PROBETAS CON 1,2% DE FIBRA VEGETAL DE YUTE DESQUEBRAJÁNDOSE.....	40



INDICE DE GRAFICOS

GRÁFICA 1: COMPORTAMIENTO DE LAS PROBETAS CON UN CURADO DE 7 DÍAS AL SER SOMETIDAS A UNA CARGA UNIAXIAL.	41
GRÁFICA 2: COMPORTAMIENTO DE LAS PROBETAS CON UN CURADO DE 14 DÍAS AL SER SOMETIDAS A UNA CARGA UNIAXIAL.	42
GRÁFICA 3: COMPORTAMIENTO DE LAS PROBETAS CON UN CURADO DE 28 DÍAS AL SER SOMETIDAS A UNA CARGA UNIAXIAL.	43
GRÁFICA 4: RESISTENCIA MÁXIMA DE LAS MUESTRAS.	48
GRÁFICA 5: ELASTICIDAD ALCANZADA DE LAS MUESTRAS SOMETIDAS A ESFUERZOS DE COMPRESIÓN PARA DIFERENTES DÍAS DE CURADO.	50
GRÁFICA 6: ESFUERZOS MÁXIMOS ALCANZADOS POR LAS MUESTRAS BAJO ENSAYOS DE COMPRESIÓN PARA UN CURADO DE 7 DÍAS.	54
GRÁFICA 7: ESFUERZOS MÁXIMOS ALCANZADOS POR LAS MUESTRAS BAJO ENSAYOS DE COMPRESIÓN PARA UN CURADO DE 14 DÍAS.	55
GRÁFICA 8: ESFUERZOS MÁXIMOS ALCANZADOS POR LAS MUESTRAS BAJO ENSAYOS DE COMPRESIÓN PARA UN CURADO DE 7 DÍAS.	55



INDICE DE TABLAS

TABLA 1: DOSIFICACIONES DE MATERIALES Y FIBRAS PARA LA REALIZACIÓN DE LAS 45	
PROBETAS.	35
TABLA 2: PROMEDIO DE LOS DATOS OBTENIDOS AL SOMETER A ENSAYOS DE COMPRESIÓN	
LAS PROBETAS CON 7 DÍAS DE CURADO (LETRA A).	44
TABLA 3: PROMEDIO DE LOS DATOS OBTENIDOS AL SOMETER A ENSAYOS DE COMPRESIÓN	
LAS PROBETAS CON 14 DÍAS DE CURADO (LETRA B).	45
TABLA 4: PROMEDIO DE LOS DATOS OBTENIDOS AL SOMETER A ENSAYOS DE COMPRESIÓN	
LAS PROBETAS CON 28 DÍAS DE CURADO (LETRA C).	46
TABLA 5: DATOS PROMEDIO PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE TODOS LOS	
TIEMPOS DE CURADO DE LAS PROBETAS CON FIBRAS DE YUTE.	47
TABLA 6: DATOS PROMEDIO PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE TODOS LOS	
TIEMPOS DE CURADO PARA LAS PROBETAS CON FIBRAS DE ACERO.	47
TABLA 7: DATOS PROMEDIO PARA LA ELASTICIDAD DE TODOS LOS TIEMPOS DE CURADO DE	
LAS PROBETAS CON FIBRAS DE YUTE.	49
TABLA 8: DATOS PROMEDIO PARA LA ELASTICIDAD DE TODOS LOS TIEMPOS DE CURADO DE	
LAS PROBETAS CON FIBRAS DE ACERO.	49

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES GENERALES

El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo debido a sus altas resistencias, durabilidad y versatilidad. Es una mezcla de cemento, agregados como arenas y grava, agua y aditivos, que se utiliza para la creación de estructuras sólidas y estables. El hormigón se ha usado durando siglos en la construcción de edificios, puentes, carreteras, túneles y muchas otras estructuras.

Si bien el hormigón presenta buenas respuestas ante los esfuerzos compresivos en general, bajo los esfuerzos de tracción y grandes deformaciones no es tan superior respecto a la resistencia a la compresión, por ello, se ha buscado agregar otro tipo de materiales dentro de su uso, dentro de las cuales se destaca el acero y los polímeros para aumentar las resistencias y la ductilidad del material en conjunto. El hormigón reforzado con fibras es una técnica constructiva que combina dos materiales fundamentales: el hormigón y las fibras de diferentes materiales. Mientras que el hormigón proporciona resistencia a la compresión, las fibras proporcionan resistencia a la tracción y ductilidad, haciendo que ambas permitan hacer una estructura sólida y duradera.

Uno de los avances más destacados en el campo del hormigón es el hormigón proyectado, también conocido como "shotcrete" en inglés. El hormigón proyectado es una técnica para la aplicación del hormigón mismo, que implica la proyección a una alta velocidad gracias a la presión de aire desde la boquilla de un equipo conectada a una bomba, generando un hormigón compactado en la superficie donde se aplica gracias su propio momentum.

Una variante del hormigón proyectado es el hormigón proyectado con fibras. Estas fibras pueden ser de distintos materiales, como normalmente lo son el acero, polímeros o vidrio, las que se agregan para mejorar la resistencia a tracción y reducir la formación de grietas. Las fibras funcionan como refuerzo estructural, distribuyendo las cargas y proporcionando una mayor resistencia general al hormigón.

Si bien el hormigón proyectado con fibras ofrece beneficios adicionales en comparación con el hormigón convencional y el hormigón proyectado sin fibras, tales como lo son una mayor resistencia a los impactos, una mayor capacidad de absorción de energía, una mayor durabilidad y una mejor resistencia a la fisuración, dentro del área de la minería se busca en todo momento disminuir el impacto con el medio ambiente, por lo que es importante buscar otros tipos de fibras que logren cumplir requisitos similares para su utilización.

Para la presente investigación, se selecciona la fibra vegetal de yute para la mezcla del hormigón, donde se realizan ensayos, evaluación y comparación con fibras de acero con diferentes e igual dosificación de fibras en un entorno común para ambos casos.

-
-
-
-
-
-
-
-
-
-
-

1.2. OBJETIVOS

1. 1.1.

1.2.1. OBJETIVO GENERAL DEL TRABAJO

Analizar el comportamiento del hormigón proyectado con fibra vegetal de yute y con fibras de acero ante esfuerzos compresivos.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL TRABAJO

- Medir el comportamiento del shotcrete sin fibras ante esfuerzos compresivos.
- Medir el comportamiento del shotcrete con fibras de acero ante esfuerzos compresivos.
- Medir el comportamiento del shotcrete con fibras vegetales de yute ante esfuerzos compresivos.
- Comparar las resistencias obtenidas ante esfuerzos compresivos de ambas fibras en el shotcrete.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. HORMIGÓN PROYECTADO

En Chile se ha otorgado el termino de “Hormigón Proyectado” para el Shotcrete por el Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile en la Guía Chilena del Shotcrete, según la definición del “American Concrete Institute” (ACI), donde se define como un “hormigón colocado por proyección neumática de alta velocidad desde una boquilla”.

Según el EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems), el shotcrete es una técnica de aplicación de hormigón en la que se proyecta o rocía una mezcla de hormigón a alta velocidad sobre una superficie utilizando aire comprimido. Esta técnica también se conoce como

“hormigón proyectado” o “concreto lanzado”. La mezcla mencionada, puede llevar normalmente aditivos, incluir adiciones, fibras o combinaciones de estas.

El shotcrete es ampliamente utilizado en la construcción debido a su versatilidad y capacidad para adaptarse a diferentes tipos de proyectos y estructuras. Se utiliza en aplicaciones que van desde revestimiento de túneles en minería, hasta reparaciones estructurales, construcción de piscinas y refuerzo de taludes.

La mezcla de hormigón utilizada en el shotcrete es similar a la del hormigón convencional, que incluye cemento, agregados como arena y grava, agua y aditivos. Sin embargo, el shotcrete puede tener modificaciones para ayudar a su correcta proyección, adherencia a la superficie y/o aumentar y modificar sus resistencias ante los esfuerzos. El shotcrete ofrece varias ventajas en comparación con otros métodos de aplicación de hormigón, como la capacidad de cubrir áreas grandes en poco tiempo, la habilidad de adaptarse a formas y superficies irregulares, y la posibilidad de aplicarse en áreas de difícil acceso. Además, el shotcrete puede proporcionar una excelente resistencia mecánica y durabilidad cuando se aplica correctamente.

La aplicación del shotcrete posee un proceso que implica el uso de una boquilla especial conectada a una manguera. La mezcla de hormigón se introduce en la boquilla y se impulsa hacia la superficie a alta velocidad mediante aire comprimido. Esto permite que el hormigón se adhiera y se compacte eficientemente en la superficie, creando una capa sólida y duradera.

El shotcrete está clasificado en dos tipos según la Guía Chilena del Shotcrete, dependiendo del proceso en el que se proyecta: shotcrete por vía húmeda y shotcrete por vía seca. El primero, shotcrete por vía húmeda, consta en el proceso del cemento, áridos y otros componentes por lotes y se mezclan juntos en una planta o equipo móvil de mezclado, así luego son transportados y descargados a una bomba, donde la mezcla se transmite a través de un sistema de tuberías y mangueras a una boquilla desde la cual se proyecta neumáticamente sobre el sustrato. En este hormigón proyectado se incorpora el aditivo acelerante antes de

ingresar a la boquilla. Por otro lado, el shotcrete por vía seca, consta en el proceso por lotes donde el cemento y los agregados se mezclan mecánicamente sin hidratarse, los que son transportados neumáticamente por mangueras o tuberías a la boquilla, y es allí donde se produce la hidratación, antes de realizar su proyección. Este hormigón proyectado también puede incluir aditivos o fibras, o la combinación de ambos.

2.2. USOS GENERALES DEL HORMIGÓN PROYECTADO

La técnica del hormigón proyectado es una técnica versátil con una amplia gama de usos en diversas aplicaciones de construcción. Algunos de los usos generales del hormigón proyectado son:

- **Revestimiento de túneles y minería:** El hormigón proyectado es ampliamente usado como revestimiento en túneles y galerías mineras. Proporciona una capa duradera y resistente que protege las superficies contra la erosión, la filtración de agua y las condiciones geológicas adversas.
- **Refuerzo y reparación de estructuras:** El hormigón proyectado se utiliza para reforzar y reparar estructuras existentes, como puentes, muros de contención y edificios. Puede aplicarse en áreas de difícil acceso y proporcionar una capa adicional de refuerzo estructural para mejorar la resistencia y durabilidad.
- **Construcción de piscinas:** El hormigón proyectado es una opción popular en la construcción de piscinas. Se utiliza para crear la estructura del vaso de la piscina, proporcionando una capa resistente y duradera que se adapta a las formas y tamaños deseados.
- **Estabilización de taludes y pendientes:** El hormigón proyectado se utiliza para estabilizar taludes y pendientes en terrenos inestables. Proporciona una capa de protección que evita la erosión y la caída de rocas, mejorando la seguridad y la estabilidad del terreno.
- **Construcción de estructuras subterráneas:** El hormigón proyectado se utiliza en la construcción de estructuras subterráneas, como estaciones de metro,

búnkeres y depósitos subterráneos. Proporciona una capa resistente que protege contra las presiones del suelo y las condiciones subterráneas.

- Obras de protección costeras: El hormigón proyectado se utiliza en obras de protección costera para prevenir la erosión y proteger las estructuras contra la acción del agua y las olas. Proporciona una barrera resistente y duradera que soporta las fuerzas del agua y los cambios en las mareas.

2.3. HORMIGÓN PROYECTADO PARA TUNELES MINEROS

El shotcrete es comúnmente usado como revestimiento en túneles mineros debido a sus buenas propiedades y su capacidad para adaptarse a las condiciones exigentes de este entorno. El revestimiento de túneles mineros es esencial para garantizar la estabilidad estructural, proteger contra la erosión y, sobre todo, proporcionar un entorno de trabajo seguro para los mineros.

El shotcrete es una técnica de aplicación de hormigón en la que se proyecta una mezcla de hormigón a alta velocidad sobre una superficie utilizando aire comprimido, la que permite disponer rápidamente una capa de revestimiento de hormigón en áreas grandes y de difícil acceso, como los túneles mineros. Este revestimiento ofrece varias ventajas en comparación con otros métodos de revestimiento en túneles mineros, por ejemplo, proporcionar una excelente adherencia a la superficie rocosa, garantizando una unión sólida y duradera, haciéndolo especialmente importante en el entorno minero, donde la estabilidad y la resistencia estructural son cruciales. Además, el shotcrete se adapta fácilmente a las formas irregulares de los túneles y puede cubrir áreas grandes en poco tiempo, permitiendo una aplicación rápida y eficiente, haciéndolo también especialmente beneficioso en proyectos mineros donde el tiempo es un factor crítico.

Otro factor proporcionado por el shotcrete es una alta resistencia mecánica y durabilidad, lo que lo hace adecuado para resistir las condiciones extremas y las cargas dinámicas presentes en los túneles mineros. Puede soportar la vibración, la presión y el desgaste causados por la maquinaria, los materiales transportados y las condiciones geológicas.

2.4. HORMIGÓN CON FIBRAS

Las fibras, en el contexto de los materiales de construcción, son elementos discontinuos y pequeños que se agregan a matrices de diferentes materiales, como lo puede ser el hormigón, para mejorar sus propiedades mecánicas, como vidrio, acero, carbono, vegetales, entre otros.

Cuando se añaden fibras al hormigón, se obtiene lo que se conoce como “Hormigón Reforzado con Fibras” u “Hormigón Fibroso”. Estas fibras actúan como refuerzo adicional, distribuyendo y absorbiendo las tensiones generadas dentro de la matriz de hormigón, mejorando así su resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, resistencia al impacto y durabilidad. En otras palabras, las fibras mejoran la ductilidad del hormigón.

Las fibras se pueden presentar en diferentes formas, como fibras cortadas, fibras en forma de monofilamentos, fibras retorcidas o fibras en forma de malla tridimensional. Cada tipo de fibra tiene características y propiedades específicas, y su elección depende del tipo de proyecto y las necesidades particulares.

Según la Guía Chilena del Shotcrete, el rol estructural de la fibra de refuerzo en el hormigón proyectado es proporcionar tenacidad, es decir, capacidad de carga después del agrietamiento, y no una mayor resistencia a la tracción o la flexión del hormigón no fisurado. La tenacidad describe la capacidad que tiene el hormigón reforzado con fibras para mantener y potencialmente redistribuir las cargas después de la fisuración. La tenacidad se cuantifica en términos de la capacidad de carga o de la absorción de energía post agrietamiento, la que es evaluada a través de probetas.

2.4.1. TIPOS DE FIBRAS

Según la norma ASTM C 1116, el concepto de fibra para hormigón se define como: “Filamento alargado y esbelto en forma de manojo, malla o hebra de material natural o manufacturado que puede ser distribuido a través del hormigón fresco”.

En la industria del hormigón, se utilizan diferentes tipos de fibras para mejorar las propiedades del material. Estos son algunos de los tipos más comunes de fibras utilizadas en el hormigón:

- Fibras de acero: Las fibras de acero son una opción popular debido a su alta resistencia y capacidad para resistir cargas pesadas. Mejoran la resistencia a la tracción y la resistencia al agrietamiento del hormigón, lo que hace más resistente a impactos y vibraciones.
- Fibras de polipropileno: Las fibras de polipropileno son ampliamente utilizadas en el hormigón debido a su bajo costo y facilidad de manejo. Proporcionan una buena resistencia al agrietamiento y ayudan a controlar la retracción por secado.
- Fibras de vidrio: Las fibras de vidrio ofrecen una excelente resistencia al álcali y a la corrosión, lo que las hace adecuadas para entornos agresivos. También proporcionan una buena resistencia a la tracción y a la fatiga.
- Fibras de carbono: Las fibras de carbono son muy resistentes y livianas. Se utilizan en aplicaciones donde se requiere una alta resistencia estructural, como puentes y edificios de gran altura. También ofrecen una excelente resistencia a la corrosión.
- Fibras de polímero: Las fibras de polímero, como las fibras de polietileno y poliacrilonitrilo, se utilizan para mejorar la durabilidad y la resistencia al agrietamiento del hormigón. Son livianas, resistentes a los productos químicos y proporcionan una buena resistencia a la tracción.
- Fibras vegetales: Las fibras vegetales son de tipo natural, renovables y biodegradables. Aportan beneficios como la reducción de la retracción por secado, la mejora de la resistencia a la fisuración y la absorción de energía en caso de impacto. Su uso está ganando popularidad debido a su naturaleza sostenible y su capacidad para reducir la huella ambiental del hormigón.



Imagen 1: Fibras de diferentes materiales utilizadas para variados usos en la industria de la construcción. A) Fibras de Acero, B) Fibras de Polipropileno, C) Fibras de Vidrio, D) Fibras de Carbono, E) Fibras de Polimeros, F) Fibras vegetales.

Las fibras mencionadas son solo algunos ejemplos de los tipos de fibras utilizadas en el hormigón. Cada tipo de fibra tiene características y propiedades específicas que se adaptan a diferentes necesidades y aplicaciones. La elección del tipo de fibra dependerá de los requisitos del proyecto, las condiciones de exposición y las propiedades deseadas del hormigón. Para lo anterior, existen varias normas que especifica la dosificación y las características para la utilización de fibras en el concreto, de las cuales algunas son: EN 14889-1 (Fibras para concreto Parte 1), EN 14889-2 (Fibras para concreto Parte 2), EFNARC (European Specification for Sprayed Concrete), NTC 5214 (Fibras de acero para refuerzo de concreto o ASTM A 820), NTC 5541 (Concretos reforzados con fibras o ASTM C 1116), entre otros.

Si bien existe una gran cantidad de fibras disponibles para su uso junto al shotcrete, en la actualidad se está buscando alternativas para generar una mezcla más amigable con el medio ambiente, ya que todo lo que contenga el hormigón seguirá quedando en la tierra cuando la mina o faena llegue a su fin. Por ello, se hacen estudios con fibras vegetales para ver un posible reemplazo, combinación o alguna alternativa para su uso con el hormigón.

2.4.2. FIBRAS DE ACERO

Las fibras de acero son un tipo de refuerzo utilizado en el hormigón para mejorar sus propiedades mecánicas. Estas fibras están hechas de acero de alta resistencia y se agregan al hormigón en forma de pequeños filamentos. Hay varios tipos de fibras de acero utilizadas en el hormigón y el refuerzo matriz-fibras debe tener cierta efectividad donde se exigen las siguientes propiedades:

- Resistencia a tracción mayor que la del hormigón
- Adherencia con la matriz igual o mayor que la resistencia a la tracción que la matriz sola
- Módulo de Young mayor que el hormigón

Las fibras aportan una mejora para ciertas propiedades mecánicas en el hormigón, como control de la fisuración por retracción, incremento en la resistencia al fuego, abrasión e impacto, entre otras. La normalización de las especificaciones estándar, clasificación y definición de las fibras de acero se pueden encontrar en el documento ASTM A820/A820M-06.

Las características geométricas de las fibras de acero, además de otras especificaciones, están dadas por:

- l_f : longitud de la fibra [mm]
- d : diámetro o diámetro equivalente de la fibra [mm]
- λ : esbeltez o relación de aspecto de la fibra (l_f/d)
- A_f : área de la sección transversal de la fibra [mm^2]
- R_m : resistencia a tracción de la fibra [N/mm^2] o [MPa]
- Previsiones de espacio (recubrimiento y otros)
- Forma de suministro (sueltas o en peines)

Adicionalmente, hay requerimientos mecánicos que deben ser cumplidos por las fibras, como resistencia a tracción, resistencia a flexión y condiciones de superficie. Dichas fibras pueden tener diversas formas, ya sean rectas, onduladas, corrugadas, con extremos, dentadas y otras. También tienen diferentes secciones, como circulares, cuadradas, rectangulares y planas (ilustración 2 e ilustración 3).

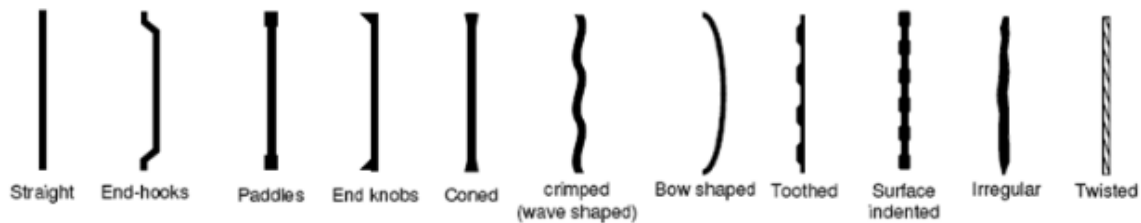


Imagen 2: Geometría de las fibras. De izquierda a derecha: Derecha, final con ganchos, paletas, final con perillas, conificado, ondulado (forma de ondas), forma de arco, dentada, superficie dentada, irregular y retorcida (Mármol, Patricia (2010). Hormigones con Fibras de Acero, Características Mecánicas).



Imagen 3: Secciones de fibras comunes. De izquierda a derecha: Circular, cuadrada, rectangular, triangular, elíptica, hexagonal, octagonal e irregular (Mármol, Patricia (2010). Hormigones con Fibras de Acero, Características Mecánicas).

2.4.3. FIBRA VEGETAL DE YUTE

Las fibras vegetales han surgido como una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente en la industria de la construcción. Estas fibras, derivadas de fuentes naturales como el cáñamo, el lino, el yute, el sisal y otras plantas, se utilizan como refuerzo en diferentes materiales de construcción, como el hormigón y los compuestos de matriz polimérica.

Las fibras vegetales ofrecen numerosas ventajas en términos de sostenibilidad y rendimiento. Son renovables, biodegradables y tienen una baja huella de carbono en comparación con los materiales tradicionales. Además, su extracción y procesamiento suelen ser menos energéticamente intensivos.

Las fibras vegetales de yute son un tipo de refuerzo utilizado en la industria de la construcción debido a sus propiedades mecánicas y su naturaleza sostenible. El yute es una fibra natural obtenida de la planta *Corchorus*, que es ampliamente cultivada en regiones tropicales y subtropicales. Estas fibras son conocidas por su resistencia a la tracción, lo que las hace adecuadas para reforzar materiales de construcción como el hormigón. Estas fibras se utilizan para mejorar la tracción y la resistencia al agrietamiento del hormigón, reduciendo así el riesgo de fallas estructurales.

Además de sus propiedades mecánicas, el yute también ofrece beneficios en términos de sostenibilidad. Es una fibra renovable y biodegradable, lo que la convierte en una alternativa amigable con el medio ambiente comparada con otros materiales sintéticos. Por el lado de la construcción, las fibras de yute se pueden incorporar en forma de refuerzo disperso en el hormigón o en otros materiales de construcción, como morteros y paneles. También se utilizan en la fabricación de productos de construcción prefabricados, como paneles de pared y tableros.

Las fibras de yute poseen diversas propiedades que las hacen adecuadas para múltiples aplicaciones, en las cuales se destacan:

- Resistencia: El yute es conocido por su alta resistencia a la tracción, lo que lo hace adecuado para aplicaciones donde se requiere fuerza y durabilidad.
- Flexibilidad: El yute es una fibra relativamente flexible a pesar de su resistencia, lo que permite su manipulación y adaptabilidad en diferentes procesos de fabricación y construcción.
- Ligereza: Es un material liviano, lo que facilita su transporte y manejo en comparación con otros materiales más pesados.
- Baja conductividad térmica: El yute tiene una baja conductividad térmica, lo que lo hace útil en aplicaciones donde se requiere aislamiento térmico, como en paneles de construcción o en productos textiles para protección contra el calor.

- Biodegradabilidad: Es una fibra natural y biodegradable, lo que significa que puede descomponerse de manera natural sin causar daños al medio ambiente, lo que lo convierte en una opción sostenible.
- Absorción de humedad: El yute tiene una buena capacidad de absorción de humedad, lo que lo hace útil en aplicaciones donde se requiere control de la humedad, como en productos textiles o en la construcción de materiales aislantes.

YUTE					
JU		Fibra Natural Vegetal Celulósica Larga Dura			Colorantes: Tina, Sulfurosos, Directos, Naftoles, Reactivos. Sensible a: Ácidos Resiste a: Disolventes y álcalis. Calor: No funde, se descompone a 160°C, carboniza a 350°C.
Aplicaciones	Cuerdas, sacos, basamento de alfombras, tapicerías.		Tasa Humedad %	13,75	
			Densidad gr./cc	1,50	
			Alargamiento %	1,5 a 2	
			Alarg. mojado %	1,5 a 2,5	
			Resistencia gr./den	3 a 4	
			Resistencia mojado	3,2 a 5,5	

Imagen 4: Propiedades específicas de la fibra vegetal de yute.

2.4.4. COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL SHOTCRETE CON FIBRAS

El shotcrete con fibras es un material que combina las propiedades del hormigón proyectado con las ventajas de las fibras de refuerzo. Su comportamiento mecánico de la combinación de estos materiales depende de varios factores, incluyendo tanto el tipo de fibras utilizadas, su cantidad y distribución en la mezcla, como las características del hormigón mismo y la técnica con la cual se proyecta.

Dentro de las características más importantes del comportamiento mecánico del shotcrete con fibras están:

- Mejora la tenacidad debido a la adición de fibras, aumentando la capacidad del material para absorber energía antes de la fractura. Esto resulta es una mayor resistencia a la fisuración en comparación con el shotcrete convencional. Las fibras actúan como puentes de refuerzo que evitan la propagación rápida de fisuras.

- Reduce la fisuración al distribuir aleatoriamente las fibras en el shotcrete, ayudando especialmente en áreas donde las tensiones pueden ser altas, como en las zonas de anclaje o en las juntas, contribuyendo a una mayor durabilidad y vida útil del material.
- Mejora la resistencia a la tracción, ya que el shotcrete por sí mismo es inherentemente débil en resistencia a la tracción. La adición de fibras, de cualquier tipo, aumenta significativamente la resistencia a la tracción del material, haciendo que aumente la capacidad de soporte de cargas y tensiones.
- Mejora la resistencia al impacto, ya que las fibras aumentan la absorción de energía generada por el impacto y evitan la propagación de fisuras.
- Las fibras ayudan a la retracción por secado, que es la contracción del hormigón a medida que pierde humedad. Esto contribuye a una menor incidencia de fisuras por retracción.
- El shotcrete con fibras tiene un comportamiento más dúctil, lo que significa que puede deformarse antes de romperse. Esto es beneficioso en situaciones donde las deformaciones son inevitables.

En general, el shotcrete con fibras ofrece una mayor resistencia a la tracción, tenacidad, resistencia al agrietamiento y ductilidad en comparación con el shotcrete convencional, lo que lo hace adecuado para una variedad de aplicaciones en la construcción, la ingeniería civil y minería.

2.5. ENSAYOS PARA LA MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

En la norma NCh1037 (Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas, 2009) se establece el método para las mediciones de la resistencia a la compresión de probetas cúbicas y cilíndricas en Chile, indicando el procedimiento de los ensayos.

2.5.1. MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN

Para ambos casos se debe acondicionar las probetas para el ensayo según la norma NCh1017 o NCh1171/1 y luego seguir las indicaciones individuales para las mediciones de cada probeta. En resumen:

- Para las probetas cilíndricas se miden dos diámetros perpendiculares entre sí (d_1 y d_2) y aproximadamente en la mitad de la altura de la probeta. Se mide la altura en 2 generatrices opuestas (h_1 y h_2)

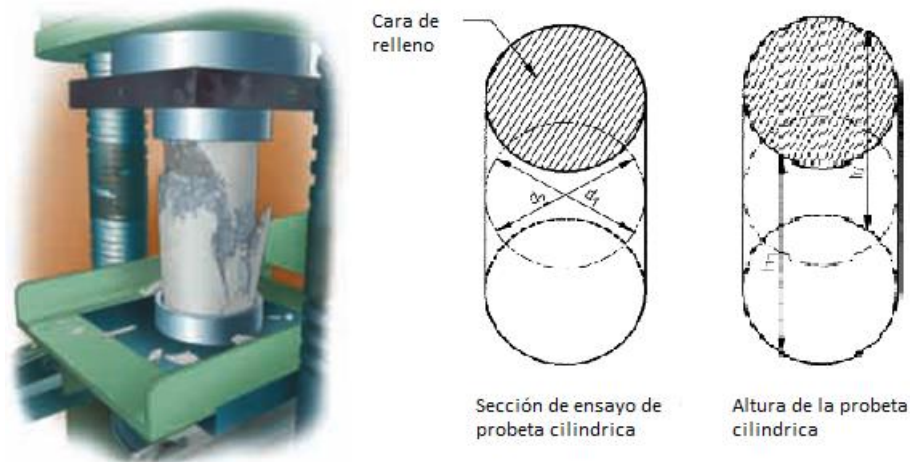


Imagen 5: Ejemplo ilustrativo de ensayo de una probeta cilíndrica y determinación de sus dimensiones.

- Para las probetas cúbicas, la cara de llenado debe estar en un plano vertical frente al operador, se miden los anchos de las 4 caras laterales de las probetas (a_1 , a_2 , b_1 y b_2) y sus alturas respectivas (h_1 , h_2 , h_3 y h_4)

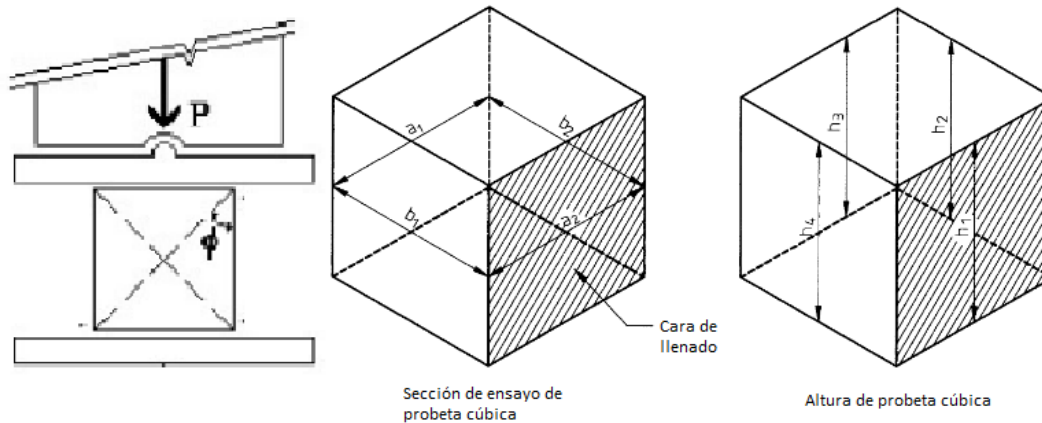


Imagen 6: Ejemplo ilustrativo de ensayo de una probeta cúbica y determinación de sus dimensiones.

Para continuar la realización de los ensayos de ambos casos, las placas deben ser limpiadas, al igual que las caras de ensayo de las probetas. Luego deben ser dispuestas en la placa inferior alineando su eje central con el centro de dicha placa y finalmente se deben someter a las cargas en forma continua y sin choques, a una velocidad constante hasta alcanzar la rotura de las probetas.

2.6. MÓDULO DE YOUNG EN SHOTCRETE CON FIBRAS

El módulo de Young juega un papel importante en la caracterización de las propiedades mecánicas de un material. El hormigón reforzado con fibras combina las ventajas que presenta el hormigón convencional y las propiedades mejoradas que aportan las fibras, lo que resulta en un material más resistente y duradero.

En el hormigón reforzado con fibras, el módulo de Young indica la medida de rigidez del material cuando se somete a cargas y deformaciones. En este caso, las fibras se agregan a la matriz de hormigón para mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la resistencia a la tracción. Por lo anterior, el módulo de Young se ve influenciado por el tipo, la forma, la cantidad y la distribución de las fibras.

Según los factores mencionados, el módulo de Young puede ser mayor o menor que el del hormigón convencional, dependiente de la configuración y las propiedades de las fibras utilizadas. Por ejemplo, las fibras de acero de alta resistencia suelen aumentar el módulo de Young del hormigón reforzado con fibras,

lo que resulta en un material más rígido. Por otro lado, las fibras de polímero pueden reducir ligeramente el módulo de Young, lo que confiere al material una mayor capacidad de deformación.

El módulo de Young se calcula mediante la relación:

$$E = \sigma / \varepsilon \quad (1)$$

Donde E es el módulo de Young en pascal, σ es la tensión uniaxial, fuerza uniaxial por superficie de la unidad o carga sometida en pascal y ε es la deformación o deformación proporcional, es decir, el cambio de la longitud dividido por la longitud inicial.

2.7. ESTUDIOS ANTERIORES

En la historia se han realizado otras pruebas de hormigón imbuidas con diferentes fibras para ser disparadas en obras de túneles, las cuales se toman como referencia para la continuidad en los estudios del Shotcrete.

2.7.1. APLICACIÓN DE HORMIGÓN PROYECTADO CON FIBRA DE ACERO COMO SOPORTE PRIMARIO PARA TÚNELES EN FLYSCH

El uso del hormigón proyectado reforzado con fibras para revestimiento de túneles es un método apropiado para usar como revestimiento primario en rocas blandas, específicamente en la secuencia de Flysch típica del túnel de Dekani (Jovičić, Vojkan et al., 2009, p. 29).

El estudio muestra que una mezcla mejorada de shotcrete reforzado con fibras, al considerar cuidadosamente la longitud, el tipo y la cantidad de fibras, junto con la elección correcta de aceleradores, se puede desarrollar como material adecuado para el soporte primario de túnel en roca heterogénea y débil, como el flysch. Las pruebas de laboratorio en muestras no tensionadas demostraron que la resistencia temprana después de la fisura de hasta 3 días fue bastante alta en comparación con otras alternativas. Este material también era muy dúctil, por lo que seguía

siendo resistente y probablemente continuaba endureciéndose a pesar de las deformaciones causadas por los movimientos de la convergencia en el túnel.

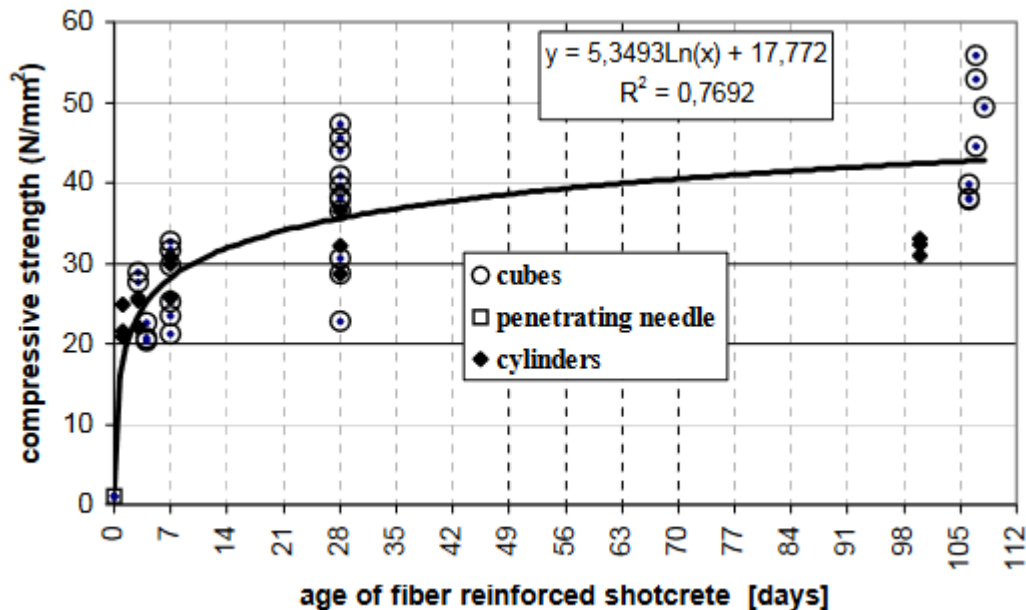


Imagen 7: Aumento de la resistencia a la compresión en cubos y cilindros que supera los 20[N/mm²] en tiempo temprano (50% de la resistencia promedio a los 110 días)

El uso de revestimiento de shotcrete reforzado con fibras en el túnel resulta exitoso (Jovičić, Vojkan et al., 2009, p. 30). Se ahorran costos en mano de obra y materiales, y el avance en las condiciones del terreno es más rápido que lo planeado. Esto permite que la obra se completara aproximadamente cuatro meses antes de lo programado, sin comprometer la calidad de la obra o los procedimientos de salud y seguridad.

2.7.2. DESEMPEÑO DEL SOPORTE SUPERFICIAL DEL SHOTCRETE DESPUÉS DE LA CARGA DINÁMICA DE EXCAVACIONES MINERAS

Se menciona el shotcrete como un componente integral del sistema de soporte superficial en excavaciones subterráneas construidas a gran profundidad. Sin embargo, el hormigón proyectado por sí solo no se considera apropiado como soporte superficial en condiciones de minería donde las fallas repentinas y violentas del macizo rocoso ocurren regularmente, incluso si las demandas de energía son

inferiores a $2,5[kJ/m^2]$ (Drover y Villaescusa, 2015, p. 15). En estas condiciones, puede ocurrir una fracturación repetitiva que lleva a la inestabilidad de la capa del shotcrete.

Las fibras pequeñas de plástico o acero proporcionan un beneficio de refuerzo comparativamente menor al shotcrete que también está reforzado con malla completamente encapsulada. El shotcrete reforzado con malla puede proporcionar una contención continua de la masa rocosa cargada a lo largo del patrón de refuerzo, incluso bajo demandas de carga dinámica extrema con discontinuidades estrechamente espaciadas y pequeños tamaños de bloques de roca. Este arreglo asegura que la carga máxima posible se transfiera hasta el doble la capacidad de disipación de energía del shotcrete reforzado con malla en comparación con una disposición de shotcrete y malla externa.

2.7.3. ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A FLEXIÓN Y EL ANCHO DE FISURA PARA HOMRIGÓN PROYECTADO REFORZADO CON FIBRAS USADO EN MINAS DE ROCA DÉBIL

En este estudio se evalúa el comportamiento de paneles redondos reforzados con fibras de acero y fibras sintéticas utilizando dos mezclas comerciales de soporte en masa rocosa débil (FRS). Se mide la carga máxima y el desplazamiento, y se determina tanto la resistencia a la flexión máxima como la resistencia a la flexión residual.

Los especímenes FRS alcanzaron la “resistencia máxima a la fisura” con la aparición y propagación de una fisura determinada. Después de esta fase de la prueba, los especímenes entraron en la capacidad de carga residual de la matriz de fibras, lo que ocurrió aproximadamente a 5-10[mm] de flexión vertical. Cuando el shotcrete se agrieta, las curvas de carga versus desplazamiento tanto para el shotcrete de fibras de acero como para el de fibras sintéticas indicaron que el shotcrete podría no ser estable después de más de 10[mm] de desplazamiento o un ancho de fisura correspondiente de 2[mm], aproximadamente el ancho de una punta de lápiz.

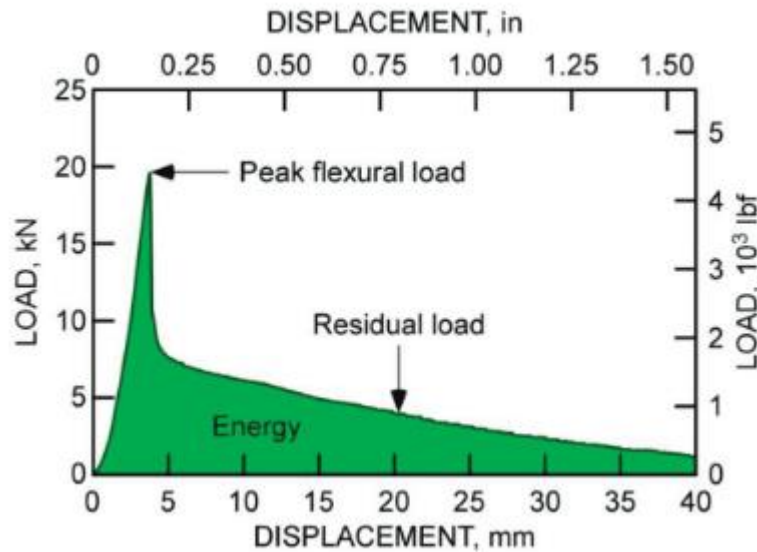


Imagen 8: Carga frente a desplazamiento de paneles redondos determinados (RDP) que indica la carga máxima de flexión y la carga residual.

2.7.4. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO Y DE CAMPO DE LA APLICACIÓN DE HORMIGÓN PROYECTADO REFORZADO CON FIBRAS

En este trabajo se estudian las diferencias en el entorno de superficie y subterráneo, el efecto del acelerador de fraguado y la cantidad de fibras en muestras de paneles para la aplicación de shotcrete en una mina subterránea en funcionamiento. Se toman muestras de cubo en la salida del mezclador, muestras de núcleo subterráneas, se probaron mecánicamente paneles que contenían diferentes cantidades de fibras y se tomaron núcleos de estos paneles para su posterior análisis.

Se utiliza fibra de poliéster en el shotcrete aplicado en la mina. Se comparan las resistencias de las muestras preparadas con la misma fibra en el laboratorio con las de las muestras tomadas de la mina. Como resultado, las muestras preparadas en el laboratorio mostraron una resistencia un 7,1% mayor después de 28 días, posiblemente debido a varias razones, incluido un posible aumento de la cantidad de agregado fino en el laboratorio y mejores condiciones de preparación de la mezcla y almacenamiento en el entorno del laboratorio.

Sample code	6UCA	6UC	6LCA	2LCA	2LPA	6LPA
Received sample / Prepared location	Underground	Underground	Laboratory	Laboratory	Laboratory	Laboratory
Fiber type filled with numen	Polipropilen	Polipropilen	Polipropilen	Copolymer		
shape of samples	Cylinder	Cube	Cube	Cube	Plaque	Plaque
The content of fiber	6	6	6	2	2	6
Set accelerating admixture	There is	-	There is	There is	There is	There is

PUHA: Polipropilen Underground High Admixture, PU: Polipropilen Underground, PLHA: Polipropilen Laboratory High Admixture, KLHA: Copolymer Laboratory High Admixture

Imagen 9: Códigos de nombres para las muestras

Se llevan a cabo pruebas de resistencia para observar el impacto del acelerador de fraguado en las muestras de cubo (6UC) tomadas del mezclador en el lugar donde se aplicó el shotcrete y que no contenían el acelerador de fraguado, y las muestras de núcleo (6UCA) que contenían el acelerador de fraguado tomadas del área de aplicación subterránea. Como resultado de los experimentos, se determina que el acelerador de fraguado no afectaba la resistencia después de 7 y 14 días, e incluso tuvo un impacto negativo, pero al final de 28 días, la resistencia aumento un 6.5% (Külekçi, Gökhan, 2021, p. 471).

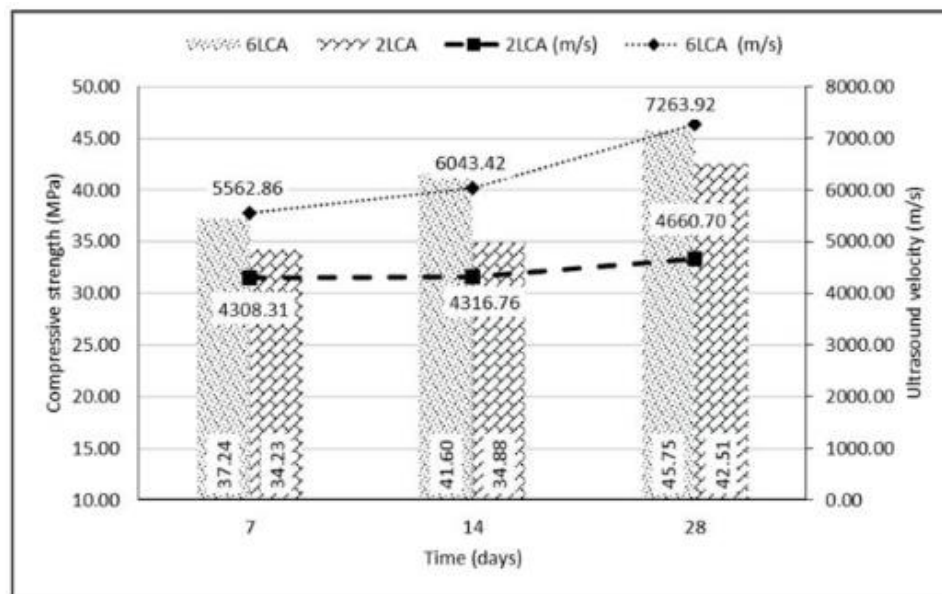


Imagen 10: Efecto de la cantidad de fibras sobre las propiedades mecánicas.

En general, el efecto de las fibras, el acelerador de fraguado y otros factores en el shotcrete mejoran la resistencia y la capacidad de absorción de energía del

shotcrete. Además, se encontró que el acelerador de fraguado no afecta negativamente la resistencia. La investigación proporciona información valiosa sobre la optimización de las mezclas de shotcrete en entornos mineros.

3. METODOLOGÍA GENERAL

Se comienza con la investigación de las propiedades mecánicas del hormigón proyectado reforzado con fibras, dando un enfoque como requisito inicial la resistencia a la compresión, además de la búsqueda y selección de una fibra alternativa a las fibras de acero, llegando a seleccionar la fibra vegetal de yute.

Inicialmente se diseñan y arman moldes cúbicos de madera con capacidad para un volumen aproximado de $1000[cm^3]$ o aristas de $100[mm]$, para así preparar un total de 45 muestras de hormigón y sus variaciones con fibras de acero y fibra vegetal de yute. Las fibras de acero son las comercializadas mediante el nombre de “DRAMIX 3D 45/50BL”, las que serán agregadas a un porcentaje de 0.4% y 1.2% respecto al peso de la mezcla. La fibra vegetal seleccionada es fibra vegetal de yute, la cual es deshilachada desde cordones de yute comercializadas en ovillos. El hormigón utilizado es el llamado “Cemento Plus G45” de Cementos Transex.

Las probetas por realizar son: 9 probetas solamente con hormigón; 18 probetas con fibras de acero, donde 9 poseen un 0.4% y otras 9 poseen un 1.2% de fibras respecto al peso de la mezcla; y 18 probetas con fibras vegetal de yute, donde 9 poseen un 0.4% y otras 9 poseen un 1.2% respecto al peso de la mezcla. Estas muestras son dispuestas a diferentes tiempos de curado en agua, donde 3 de cada tipo serán curadas a 7 días, otras 3 de cada tipo serán curadas a 14 días y las últimas 3 serán curadas a 28 días. El proceso de la realización de las probetas termina con un lijado de las superficies y un tratamiento posterior en un horno con secado a muerte a $105[^\circ C]$ durante 24 horas.

Todas las probetas obtenidas se someten a ensayos de compresión para la obtención de datos de carga máxima capaz de soportar y la deformación que estas presentan ante dichas cargas. Junto a lo anterior, se obtienen las curvas de carga versus deformación para verificar su forma.

La etapa final consiste en la obtención de la resistencia máxima a la compresión mediante el UCS, del inglés “Unconfined Compressive Strength”, o Resistencia a la compresión uniaxial, además del módulo de elasticidad que poseen. Esto continua con el análisis de datos y la comparación entre los resultados obtenidos para las diferentes fibras y sus dosificaciones.

3.1. OBTENCIÓN DE DATOS

Se comienza con la investigación de las propiedades mecánicas del hormigón proyectado reforzado con fibras, dando un enfoque como requisito inicial la resistencia a la compresión, además de la búsqueda y selección de una fibra alternativa a las fibras de acero, llegando a seleccionar la fibra vegetal de yute.

Inicialmente se diseñan y arman moldes cúbicos de madera con capacidad para un volumen aproximado de $1000[cm^3]$ o aristas de $100[mm]$, para así preparar un total de 45 muestras de hormigón y sus variaciones con fibras de acero y fibra vegetal de yute.

3.2. MATERIALES Y DOSIFICACIONES

Los materiales utilizados para la creación de los ensayos son los siguientes:

- Fibras de acero “DRAMIX 3D 45/50BL”
- Fibra vegetal de Yute, comercializadas en cordones en un ovillo
- Cemento Plus G45 de la marca “Transex”
- Arena gruesa de la marca “Áridos Figueroa”
- Agua

Si bien la cantidad del material es igual independientemente del tipo de hormigón que se esté creando, respetando la relación w/c (agua cemento) de 0,5, las dosificaciones de fibras difieren en los 3 casos, es decir, son diferentes para cuando se requieran un 0,4% y un 1,2%.

	Hormigón sin fibra	Hormigón con fibra (0,4%)	Hormigón con fibra (1,2%)
Material	Cantidad [g]	Cantidad [g]	Cantidad [g]
Agua	782	782	782
Arena	5380	5380	5380
Cemento	1564	1564	1564
Fibras	0	31	93

Tabla 1: Dosificaciones de materiales y fibras para la realización de las 45 probetas.

3.3. PREPARACIÓN DEL HORMIGÓN

El hormigón es preparado en el laboratorio del departamento de Ingeniería civil de Minas de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM), donde la mezcla se realizó a mano en cada una de las preparaciones en tambores plásticos y se masó en todo momento los materiales utilizados. Dicha mezcla es depositada en moldes creados anteriormente con madera barnizada (para evitar la deformación por la humedad, además de la adhesión del hormigón en las paredes) y compactados con una base sólida y lisa por encima.



Imagen 11: A la izquierda los moldes de madera utilizados para el depósito y solidificación del hormigón. A la derecha los materiales pesados y separados para una tirada de hormigón.

Inicialmente se realiza la cantidad de mezcla necesaria para 3 probetas de hormigón simple, es decir, que no contengan ningún tipo de fibras, 3 probetas con fibras de acero al 0,4% y otras 3 al 1,2%, para terminar con 3 probetas con fibras vegetales de yute al 0,4% y otras 3 al 1,2%, haciendo un total de 15 muestras para

un curado de 7 días y poder tenerlas como referencia principal y verificar que la mezcla sea la correcta.

Posterior al depósito de la mezcla, los moldes son cubiertos por Nylon para evitar impurezas y se dejan en una sala cerrada en las dependencias para su solidificación.

Luego se sigue con el resto de las probetas; 15 de las mismas condiciones iniciales para un curado de 14 días y otras 15 para un curado de 28 días.

3.3.1. NOMENCLATURA DE PROBETAS

Se le asigna a cada probeta una nomenclatura específica, la que depende de si contiene o no contiene fibra, que tipo de fibra posee, el porcentaje de fibra que posee, el tiempo de curado y el número de muestra.

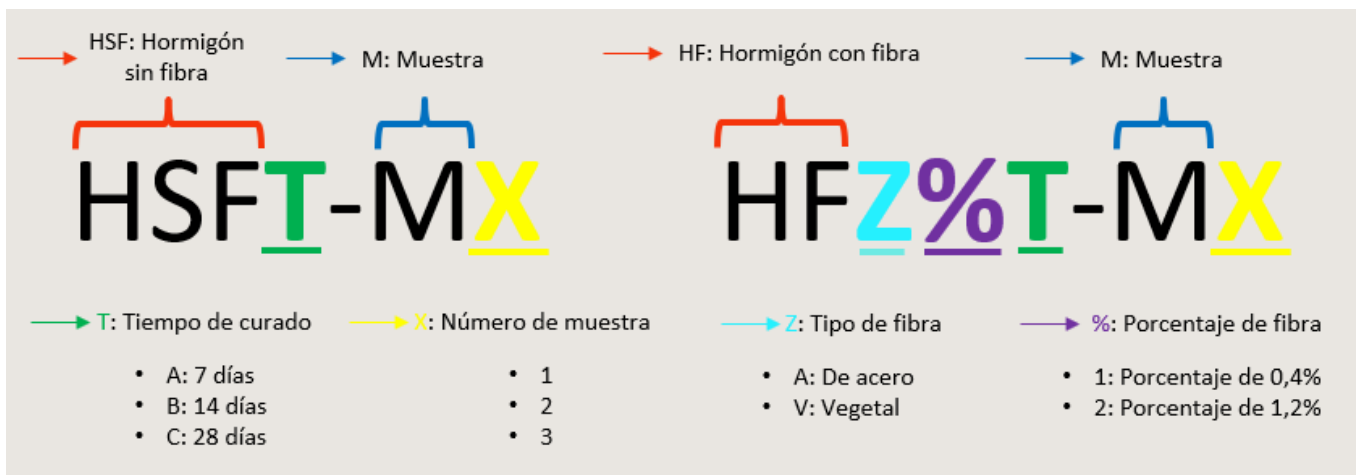


Imagen 12: Nomenclatura creada para diferenciar las probetas al realizar los ensayos de compresión.

Se muestran 2 ejemplos para demostrar el tipo de nomenclatura:

- HSFB-M1: Hormigón sin fibra con tiempo de curado de 14 días – muestra 1
- HFV1A-M2: Hormigón con fibra vegetal de 0,4% con tiempo de curado de 7 días – muestra 2



Imagen 13: Nomenclatura dispuesta en las probetas para un curado de 14 días (letra B).

3.4. CURADO Y SECADO

El curado es realizado en recipientes plásticos en el laboratorio de la UTFSM para controlar la humedad del ambiente. Estos recipientes se llenan de agua y se curan las muestras a tiempos de 7, 14 y 28 días según lo requerido

Luego del curado, todos los moldes son pasados por un proceso de pulido de caras, para evitar todo vestigio de deformidades que no permita una nivelación adecuada para la toma de datos en la prensa. Posteriormente, las muestras son llevadas a un horno y son secadas a muerte durante 24 horas a 105°C].



Imagen 14: Recipientes plásticos utilizados para el curado de las probetas de hormigón.

3.5. ENSAYOS DE COMPRESIÓN

En esta sección se deben realizar los 45 ensayos para todas las muestras de hormigón creadas después del curado y posterior a las 24 horas de secado en el horno. Estos ensayos se realizan en una prensa SERCOMP 7 y el software ADVANTEST 9 en una consola conectada a una computadora. Aquí se programan las características de los ensayos de compresión, los cuales son una velocidad constante de compresión de $0,060[MPa/s]$, un “set point” para el inicio de los ensayos, una sensibilidad punta y ajustar los parámetros de área y carga.

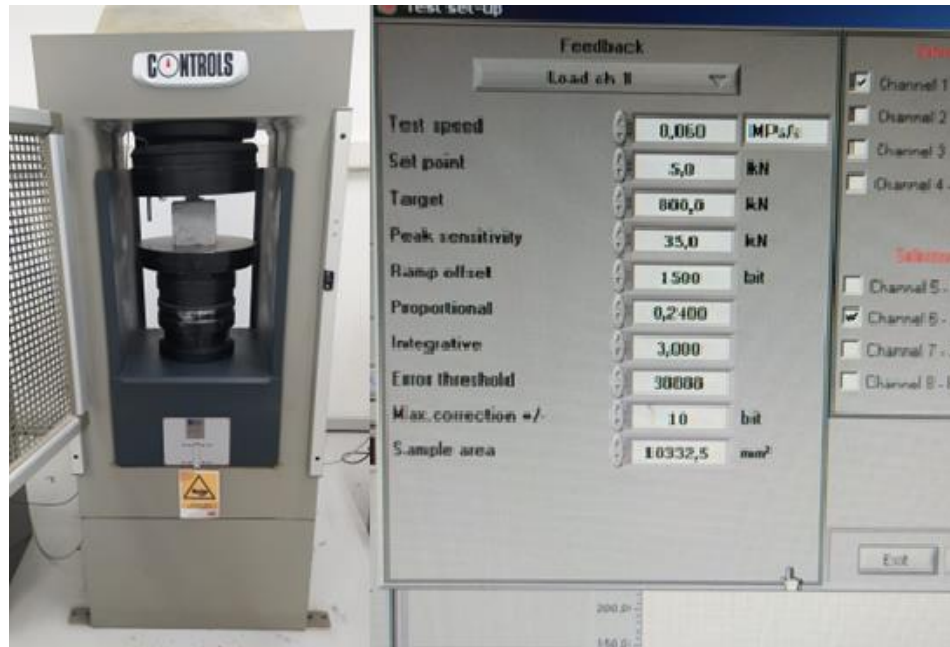


Imagen 15: Prensa para ensayos SERCOMP 7 conectada a una consola ADVANTEST 9 y comprobación de parámetros en software.

A medida que se obtienen los datos, estos van siendo comprobados gracias al programa ADVANTEST 9, ya que el software entrega en directo una gráfica de carga-deformación.

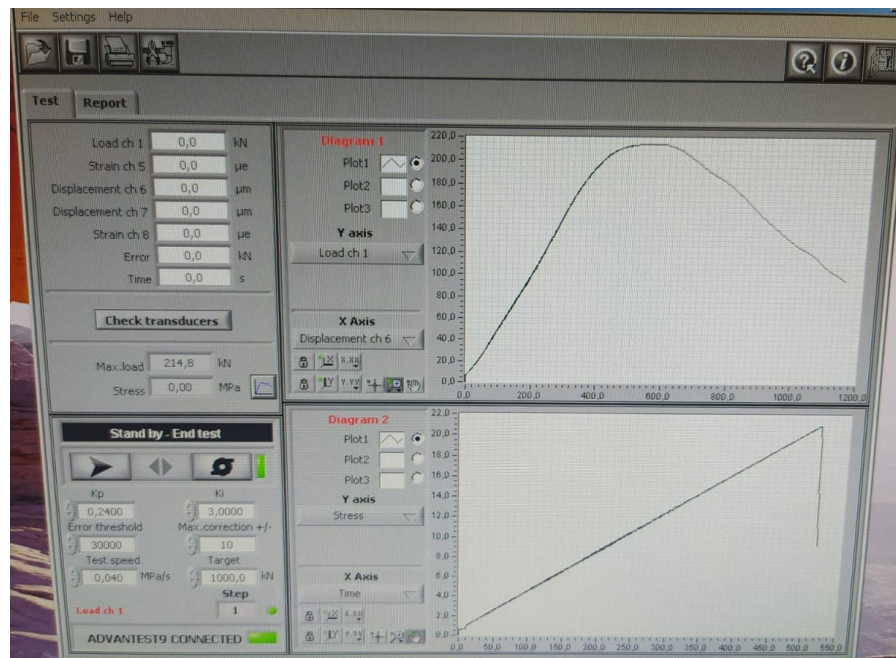


Imagen 16: Gráfica superior de carga versus deformación entregada por el software de manera instantánea a medida que se realiza un ensayo de compresión.

Todos los datos obtenidos de la compresión de las probetas son exportados en archivos Excel para ser analizados a posteriori y hacer las gráficas correspondientes de cada uno de ellos, las cuales están dispuestos en las secciones de “Anexo de Tablas”.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se muestran los datos y las curvas de carga-deformación obtenidas en los ensayos de las probetas de todos los contenidos de fibras y tiempos de curado, a excepción de las probetas cuyo porcentaje de fibra vegetal de yute es del 1,2%, debido a que no fueron capaces de solidificar correctamente para realizar las pruebas, desquebrajándose hasta romperse antes de ser sometidas en el curado.

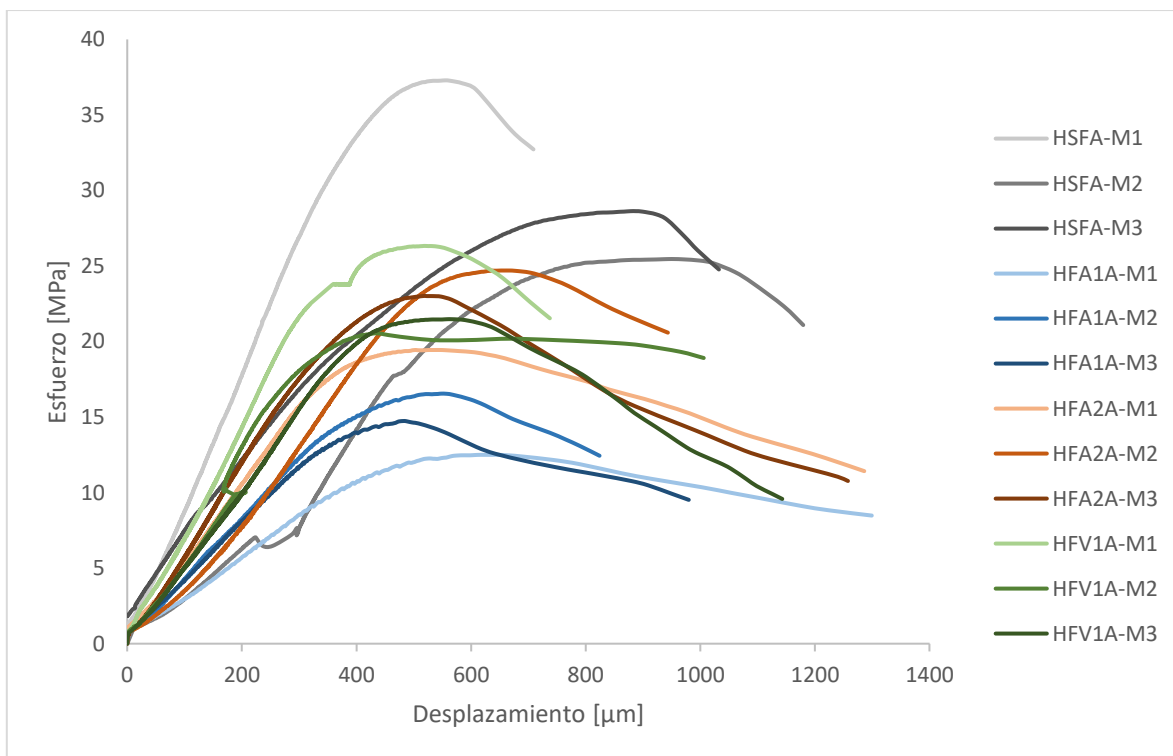


Imagen 17: Probetas con 1,2% de fibra vegetal de yute desquebrajándose.

ESPECTROS DE CURVAS CARGA-DEFORMACIÓN Se muestra el comportamiento que tienen las diferentes muestras con un curado en agua durante 7, 14 y 28 días, con su respectivo lijado y posterior secado a muerte. El comportamiento de las curvas es el esperado normalmente, ya que este tipo de espectro se caracteriza por presentar al inicio del tramo un aumento constante de la deformación a medida que la carga aumenta. Durante este tramo se forman microfisuras en las probetas hasta llegar a un punto máximo de carga, donde la mayor resistencia la realiza la masa de hormigón, mientras que la intervención de

las fibras hace que las curvas presenten un mayor alcance de deformación lineal antes de llegar a dicha resistencia máxima. A partir de la llegada de este punto máximo, en las probetas comienza a aparecer una grieta visible, la cual se propaga por la masa de hormigón, haciendo que la curva comience a decaer, pero gracias a las fibras, este decaimiento es menor que el hormigón que no las posee, aumentando su deformación gracias a que éstas se oponen a la propagación de las grietas.

Según lo anterior y como se puede ver en la *gráfica 1*, todas las curvas presentan un comportamiento como el esperado, llegando a un punto de esfuerzo máximo para luego decaer de manera no abrupta, aumentando así la ductilidad general del hormigón.

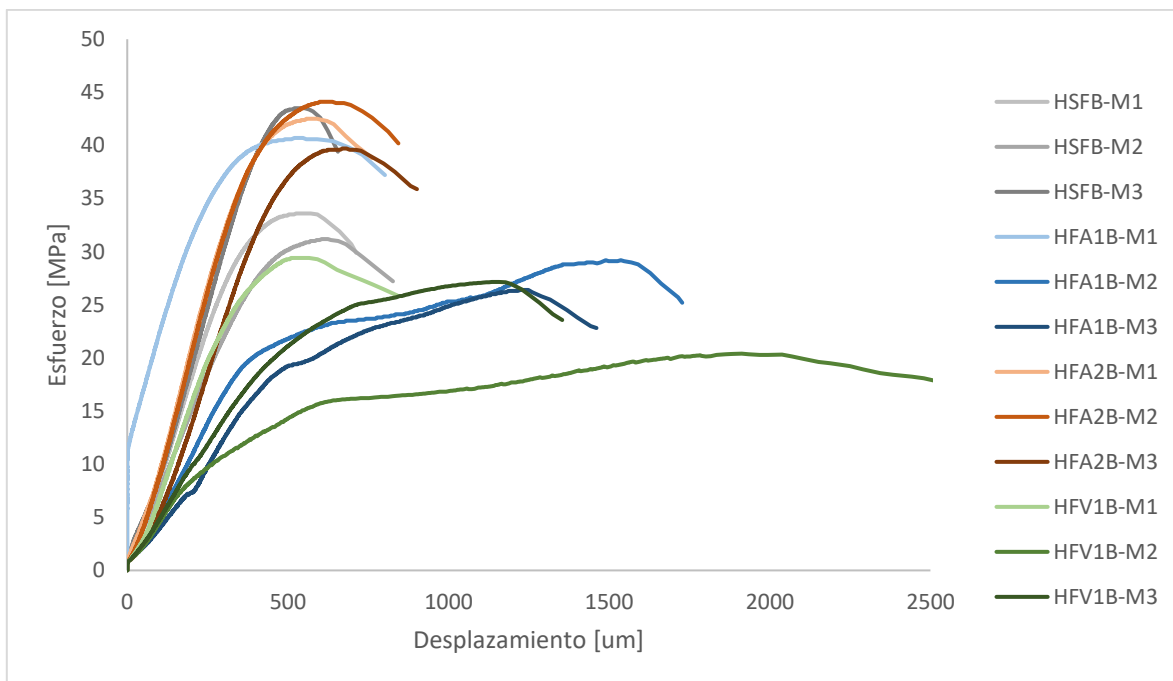


Gráfica 1: Comportamiento de las probetas con un curado de 7 días al ser sometidas a una carga uniaxial.

Luego de alcanzar el máximo y gracias al actuar de las fibras, el comportamiento de las gráficas se debe a la adherencia que tiene la matriz de hormigón junto a dichas fibras y sus propiedades. De lo anterior, se espera que, al tener el mismo

comportamiento, las fibras vegetales de yute sean capaces de soportar una carga mayor en algún porcentaje comparadas con las fibras de acero. Es decir, que el comportamiento de las curvas se desplace hacia la derecha, permitiendo que las probetas presenten una mayor deformación antes de romperse.

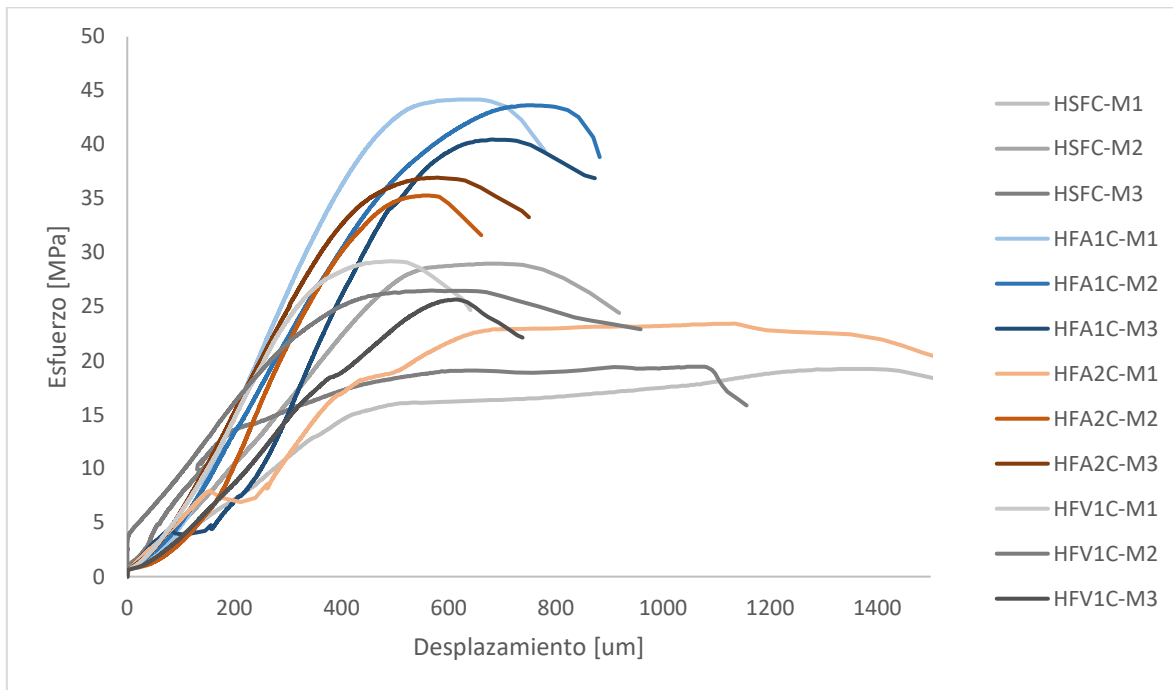
En la *gráfica 2* se puede observar como el comportamiento de las fibras de yute tienen un comportamiento similar a las fibras de acero, haciendo incluso que una de las muestras presente una deformación lineal mucho mayor que el resto, pero un esfuerzo máximo menor. Lo anterior debido a que, en ocasiones, las fibras de yute generan pequeñas bolitas como ovillos que se ubican justo donde comienza a crearse la grieta y su propagación.



Gráfica 2: Comportamiento de las probetas con un curado de 14 días al ser sometidas a una carga uniaxial.

En la *gráfica 3*, también se pueden ver los comportamientos normales de dichos espectros de curvas según la teoría, pero en este caso hay dos muestras que presentan deformaciones lineales mayores, donde la probeta HFA2C-M1 (hormigón con fibras de acero al 1,2% con 28 días de curado, muestra 1) y la probeta HSFC-M1 (hormigón sin fibras con 28 días de curado, muestra 1) tienen deformaciones lineales mayores al resto, lo cual puede deberse a que la zona donde se realizaron

las fisuras podrían contener algún material que soportase de manera diferente el agrietamiento.



Gráfica 3: Comportamiento de las probetas con un curado de 28 días al ser sometidas a una carga uniaxial.

4.1. RESULTADOS POR DÍAS DE CURADO

Los siguientes gráficos tienen por objetivo realizar una post comparación directa entre los niveles de resistencia capaces de soportar y el módulo de elasticidad que poseen las diferentes mezclas de hormigón en conjunto con los distintos tipos de fibras y sus diferentes dosificaciones.

4.1.1. CURADO DE 7 DÍAS

El promedio de las resistencias a la compresión máxima es mayor en la muestra con fibra vegetal de 0,4% comparada con las muestras de fibra de acero de 0,4% y 1,2% para el curado de 7 días, con un valor extra del 56,16% respecto a su símil de 0,4%. A su vez, el módulo de Young en las muestras con fibra vegetal es notoriamente mayor respecto a su igual con fibras de acero, con un 95% más en su valor. Mientras que respecto a las muestras de 1,2% de fibras de acero, solo está por debajo en un 14,88%.

	UCS $\bar{X}$ [MPa]	Módulo de Young, E [MPa]
HSFA-M1	30,5 ± 6,1	8256,3 ± 2771,7
HSFA-M2		
HSFA-M3		
HFA1A-M1	14,6 ± 2,0	5045,0 ± 201,6
HFA1A-M2		
HFA1A-M3		
HFA2A-M1	22,4 ± 2,7	11559,2 ± 3367,4
HFA2A-M2		
HFA2A-M3		
HFV1A-M1	22,8 ± 3,1	9838,9 ± 3724,4
HFV1A-M2		
HFV1A-M3		

Tabla 2: Promedio de los datos obtenidos al someter a ensayos de compresión las probetas con 7 días de curado (letra A).

Por otro lado, se pueden ver diferencias en la resistencia a la compresión entre las muestras con fibras y las muestras que no lo tienen, debido a que el tamaño de fibras de 50[mm] puede ser muy grande para el tamaño de las probetas (cubo con aristas de 100[mm]).

4.1.2. CURADO DE 14 DÍAS

El promedio de las resistencias a la compresión máxima es menor en la muestra con fibra vegetal de 0,4% comparada con las muestras de fibra de acero de 0,4% y 1,2% para el curado de 14 días. A su vez, el módulo de Young en las muestras con fibra vegetal es levemente menor respecto a su símil con fibras de acero, con un valor de 9,98% por debajo. Mientras que respecto a las muestras de 1,2% de fibras de acero, está por debajo en un 21,25%.

	UCS $\bar{X}$ [MPa]	Módulo de Young, E [MPa]
HSFB-M1	36,4 ± 5,8	16646,6 ± 4085,5
HSFB-M2		
HSFB-M3		
HFA1B-M1	32,3 ± 8,1	12149,9 ± 2037,8
HFA1B-M2		
HFA1B-M3		
HFA2B-M1	42,5 ± 2,5	13888,5 ± 3622,8
HFA2B-M2		
HFA2B-M3		
HFV1B-M1	25,8 ± 4,8	10936,9 ± 3869,8
HFV1B-M2		
HFV1B-M3		

Tabla 3: Promedio de los datos obtenidos al someter a ensayos de compresión las probetas con 14 días de curado (letra B).

El promedio de la resistencia a la compresión para la fibra vegetal de 0,4% es menor que la resistencia de su símil con fibras de acero, con un 20,12% menor, mientras que comparado con las muestras con fibras de acero del 1,2% se reduce en un 39,29%.

Por otro lado, se pueden ver diferencias en los 14 días de curado entre las muestras con 0,4% de contenido de fibras respecto a las muestras que no poseen algún tipo fibra, donde las muestras con fibras en general presentan una inferioridad tanto en la resistencia máxima a la compresión, como en su elasticidad (módulo de Young).

Por otra parte, la resistencia máxima en la muestra de 1,2% es mayor respecto a las muestras sin fibras, al igual que respecto a las que contienen fibras de 0,4%.

4.1.3. CURADO DE 28 DÍAS

El promedio de las resistencias a la compresión para la fibra vegetal de 0,4% es menor que ambas resistencias de muestras con fibras de acero, donde posee un

36,68% menos respecto a la de 0,4% de fibra de acero y solo un 15,05% menos que la de 1,2%.

Por otro lado, el promedio del módulo de Young en las muestras con fibra vegetal es mayor que en el resto de las muestras, destacando más respecto a su igual en fibras de acero, teniendo un 12,15% más. Mientras que comparado con el 1,2% solo tiene un 3,57% más.

	UCS $\bar{X}$ [MPa]	Módulo de Young, E [MPa]
HSFC-M1	22,6 ± 5,6	11453,4 ± 3051,3
HSFC-M2		
HSFC-M3		
HFA1C-M1	42,8 ± 2,0	13105,2 ± 5629,7
HFA1C-M2		
HFA1C-M3		
HFA2C-M1	31,9 ± 7,4	14191,0 ± 931,1
HFA2C-M2		
HFA2C-M3		
HFV1C-M1	27,1 ± 1,9	14697,6 ± 1816,2
HFV1C-M2		
HFV1C-M3		

Tabla 4: Promedio de los datos obtenidos al someter a ensayos de compresión las probetas con 28 días de curado (letra C).

La baja de la resistencia máxima en las muestras de fibras vegetales de yute se puede deber principalmente a la absorción de agua que posee esta fibra (13,75% recuperación de humedad), además del gran contenido de fibras respecto al tamaño de las probetas.

Adicionalmente, la resistencia de a compresión máxima en las muestras con fibras de acero al 1,2% es más baja respecto a las que contienen fibras de acero al 0,4%, lo cual se puede deber a que el contenido de fibra es demasiado alto en comparación al tamaño de las probetas (cubos con aristas de 100[mm]).

4.2. COMPARACIÓN DIRECTA DE LA RESISTENCIA CON MISMO PORCENTAJE DE FIBRAS (0,4%)

La *Tabla 5* muestra el promedio de la resistencia máxima que presentan las probetas con un contenido de fibras de yute del 0,4% al ser sometidas a compresión, las cuales van en aumento a medida que el tiempo de curado también aumenta.

Fibra vegetal de Yute		
Tiempo de curado [días]	UCS [Mpa]	Desviación estándar [Mpa]
7	22,8	3,1
14	25,8	4,8
28	27,1	1,9

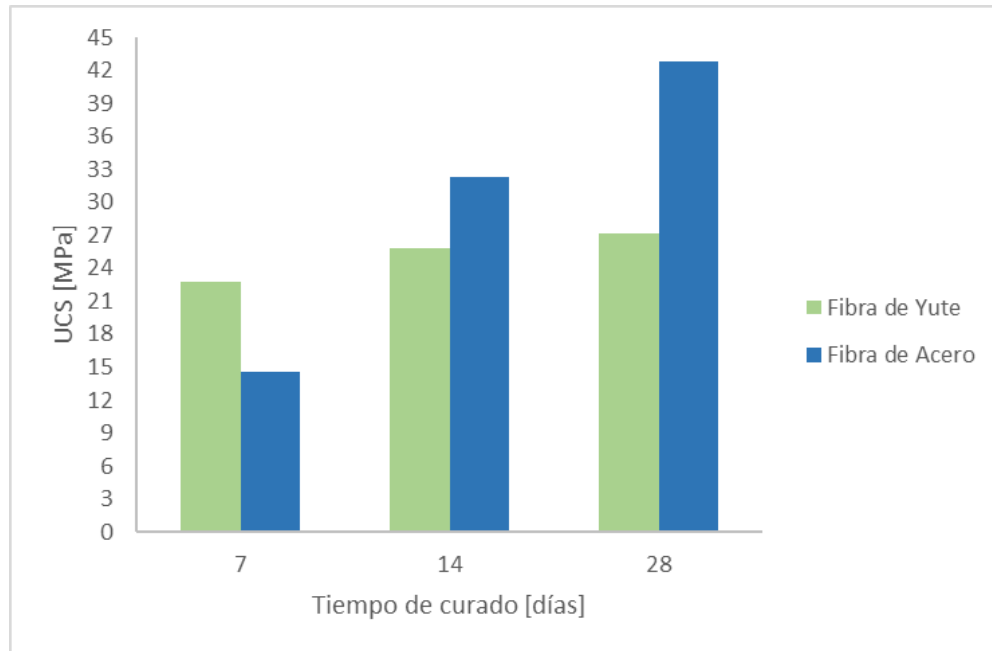
Tabla 5: Datos promedio para la resistencia a la compresión de todos los tiempos de curado de las probetas con fibras de yute.

La *Tabla 6* por otro lado, entrega el promedio de la resistencia máxima que presentan las probetas con un contenido de fibras de acero del 0,4% al ser sometidas al mismo ensayo de compresión, aumentando de igual forma cuando el tiempo de curado es mayor.

Fibra de acero		
Tiempo de curado [días]	UCS [Mpa]	Desviación estándar [Mpa]
7	14,6	2
14	32,3	8,1
28	42,8	2

Tabla 6: Datos promedio para la resistencia a la compresión de todos los tiempos de curado para las probetas con fibras de acero.

Para ambos casos anteriores se dispone la *Gráfica 7*, donde se pueden comparar directamente la resistencia a la compresión máxima para cada tipo de fibras.



Gráfica 4: Resistencia máxima de las muestras.

Ambos casos presentan la misma tendencia al transcurrir el tiempo de curado, donde al pasar de 7 a 14 días aumentan sus valores, de igual manera al pasar de 14 a 28 días, logrando destacar sus máximos valores a los 28 días.

Se aprecia que las muestras con fibra vegetal de yute poseen una menor resistencia a la compresión respecto a las muestras con fibras de acero posterior a los 14 días, mientras que, a temprana edad de curado, las muestras con fibras de yute poseen una considerable mejoría.

4.3. COMPARACIÓN DIRECTA DE LA ELASTICIDAD CON MISMO PORCENTAJE DE FIBRAS (0,4%)

En la *Tabla 7* se muestra el módulo de Young de las muestras con fibra vegetal de yute al 0,4% para los diferentes tiempos de curado, donde se visualiza el incremento de estos valores mientras los días también aumentan, llegando a su punto más alto a los 28 días.

Fibra vegetal de Yute		
Tiempo de curado [días]	Módulo de Young, E [Mpa]	Desviación estándar [Mpa]
7	9838,9	3724,4
14	10936,9	1816,2
28	14697,6	9577,0

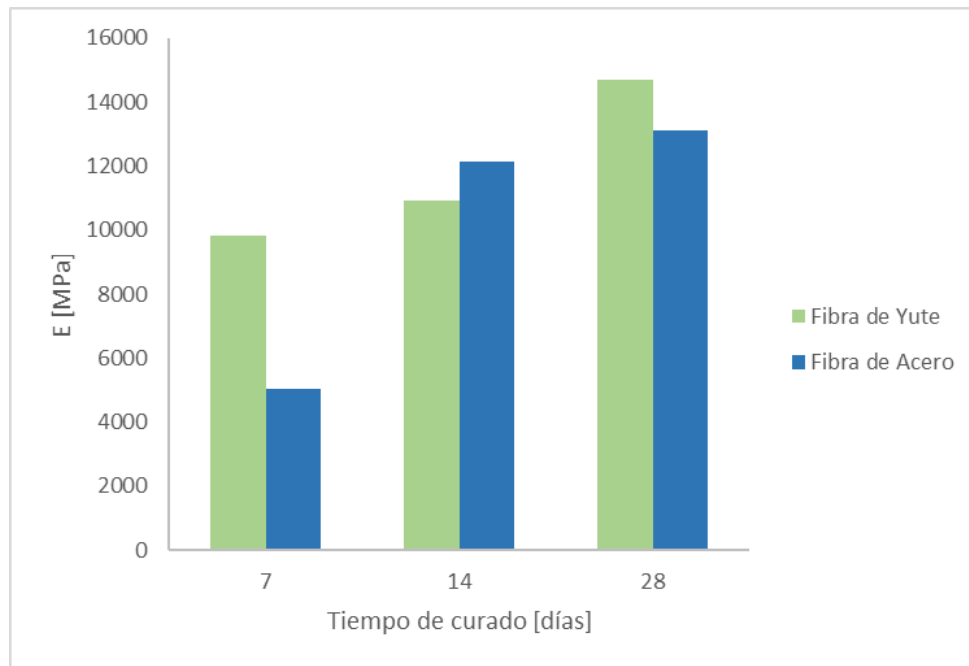
Tabla 7: Datos promedio para la elasticidad de todos los tiempos de curado de las probetas con fibras de yute.

Para el módulo de Young de las fibras de acero se dispone la *Tabla 8*, donde los valores promedios para un porcentaje de fibras de acero del 0.4% aumenta a medida que el tiempo de curado también sube.

Fibra de acero		
Tiempo de curado [días]	Módulo de Young, E [Mpa]	Desviación estándar [Mpa]
7	5045,0	201,6
14	12149,9	2037,8
28	13105,2	5629,7

Tabla 8: Datos promedio para la elasticidad de todos los tiempos de curado de las probetas con fibras de acero.

En la *Gráfica 8* se disponen los valores máximos del módulo de Young para su comparación directa, donde se visualiza en este caso que para ambas fibras aumenta la elasticidad mientras aumenta el tiempo de curado. Además, para los 7 y 28 días, la elasticidad del hormigón con fibras de yute es mayor que las que contienen fibras de acero.



Gráfica 5: Elasticidad alcanzada de las muestras sometidas a esfuerzos de compresión para diferentes días de curado.

De igual manera que ocurre con la resistencia a la compresión, ambos casos presentan la misma tendencia al transcurrir el tiempo de curado, donde al pasar de 7 a 14 días aumentan sus valores, y también al pasar de 14 a 28 días, logrando destacar sus máximos valores a los 28 días.

Se aprecia que las muestras con fibras vegetales de yute poseen una menor elasticidad respecto a las muestras con fibras de acero solo a los 14 días, mientras que a la edad temprana de 14 días y a la edad de 28 días, poseen una elasticidad promedio mayor.

5. CONCLUSIONES

En esta investigación, se realizó una evaluación de las propiedades del hormigón reforzado con dos diferentes tipos de fibras y se sometió a distintos períodos de curado con un posterior ensayo de compresión. Se visualiza que el comportamiento de las muestras varía dependiendo del tipo de fibra, su cantidad y la duración del curado. En particular, las muestras con fibras vegetales de yute exhibieron un mayor módulo de elasticidad en comparación con las muestras con fibras de acero, especialmente en la edad temprana de 7 días y la tardía de 28 días de curado.

En cuanto a la resistencia a la compresión, se observó que las muestras con fibras de acero generalmente superaron a las muestras con fibras vegetales de yute, especialmente en períodos de curado más prolongados. En general, los mejores resultados en términos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad se obtuvieron en el período de 28 días de curado, indicando que este podría ser el punto óptimo en términos de desarrollo de estas propiedades en las muestras evaluadas. Aun así, a la edad temprana de 7 días de curado, los valores de elasticidad también son notoriamente mayores en las muestras con fibra de yute respecto a las que contienen fibras de acero.

Para el periodo de 7 días de curado, las muestras con fibra vegetal de yute presentan una resistencia a la compresión y un módulo de Young superiores en comparación con las muestras de fibras de acero, destacando los valores con la misma cantidad de fibras (0,4%), donde la vegetal supera en un 56,16% a las de acero en términos de resistencia a la compresión y un 95% extra en términos de elasticidad. Además, la resistencia a la compresión disminuye en las muestras con fibras en comparación con las muestras sin fibras debido al tamaño de las fibras en relación con el tamaño de las muestras cúbicas, pero no así el módulo de Young, donde las fibras aportan una elasticidad mejor a la mezcla general.

En el curado de 14 días, las muestras con fibra vegetal de yute muestran una pequeña desventaja en términos de elasticidad en comparación con las muestras

de fibras de acero, pero en términos de resistencia a la compresión, esta diferencia aumenta notoriamente, con un 20,12% para la cantidad de 0,4% de fibras, lo cual se puede atribuir a la absorción de agua que tiene el yute, lo que impide un correcto curado de las muestras.

En el periodo de 28 días de curado, las muestras con fibra vegetal de yute muestran una resistencia a la compresión inferior en comparación con las muestras con fibras de acero, destacando la diferencia con su símil de 0,4%, con un valor de 36,68% menos. Por otro lado, el módulo de Young en las muestras con fibra vegetal de Yute es mayor que en las muestras con fibras de acero, con un porcentaje 12,15%. Los niveles menores para el caso de resistencia a la compresión se atribuyen a la absorción del agua que tiene el yute y a su alta concentración dentro de las muestras, pero esta concentración también es la que afecta directamente a su elasticidad.

Respecto a la comparación directa de la resistencia y elasticidad con el mismo porcentaje de fibras al 0,4%, se observa que ambas resistencias a la compresión y elasticidad siguen una tendencia similar a medida que aumenta el periodo de curado. A los 14 y 28 días de curado, las muestras con fibras de acero superan a las muestras con fibras vegetales de yute en términos de resistencia a la compresión, pero finalmente a los 28 días, las muestras con fibras de yute son superiores en términos de elasticidad. Adicionalmente, a temprana edad de curado (7 días), las muestras con fibras de yute presentan una mejora significativa en comparación con las muestras con fibras de acero.

5.1. RECOMENDACIONES

Según la Guía Chilena del Shotcrete, el shotcrete (sin acelerador) tiene una resistencia en un rango de entre 20 y 70[MPa] a los 28 días, y para refuerzos de túneles se especifica un mínimo de 30[MPa]. Por lo anterior, si bien en términos de elasticidad el hormigón con fibras de yute tiene características similares a las de acero, en términos de resistencia a la compresión se encuentra por debajo del

estipulado, por lo que se recomienda hacer nuevas mezclas para llegar a las condiciones.

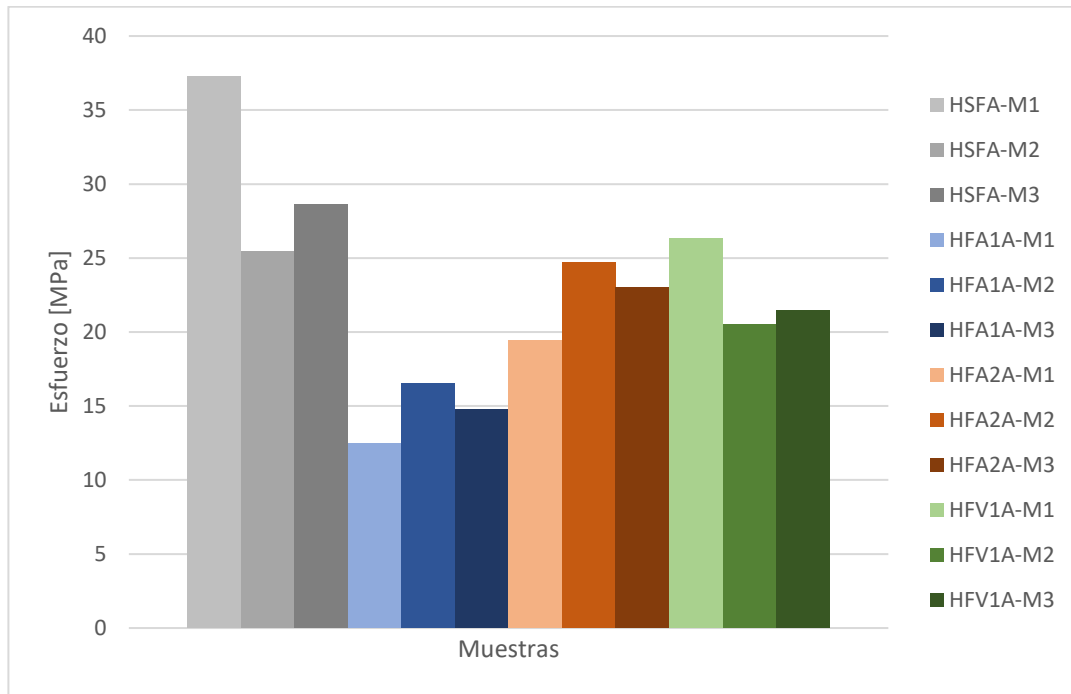
Realizar nuevamente las mezclas con fibras de yute con la maquinaria lo más especializada posible para su creación, ya que las hechas en esta investigación están realizadas “a mano”.

Esta investigación ayuda a proporcionar información sobre cómo la elección del tipo de fibra y la duración del curado pueden influir en las propiedades del hormigón, lo que puede ser de interés en aplicaciones de construcción y diseño de estructuras. Sin embargo, es importante destacar que las muestras con fibras vegetales de yute mostraron una menor resistencia, pero una mayor elasticidad, en comparación con las fibras de acero a los 28 días, lo que sugiere que la elección del material de refuerzo debe ser cuidadosamente considerada en función de los requisitos específicos del proyecto y el tiempo de curado disponible.

En lo posible, las fibras de yute deben ser integradas en tamaño lo más homogéneas posible, ya que su venta es en rollos de cuerda y las fibras son separadas mediante una picadora de manera aleatoria, por lo que su largo puede ser muy grande para lo que se requiere.

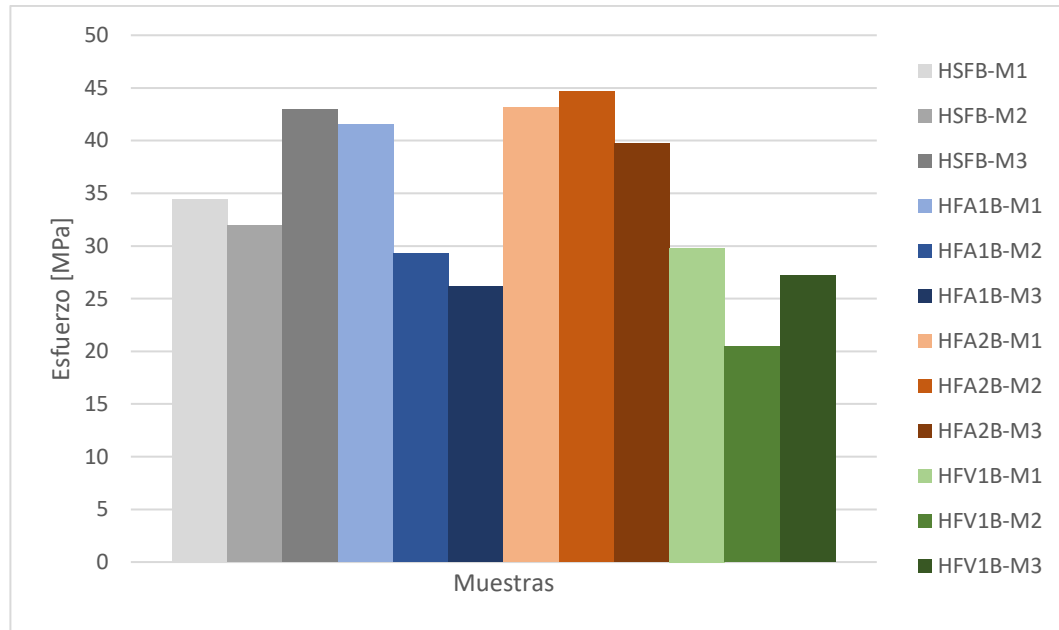
6. ANEXOS

La *gráfica 6* muestra en conjunto los esfuerzos máximos alcanzados por todas las muestras con un tiempo de curado de 7 días, entregados anteriormente en la *Tabla 2*.



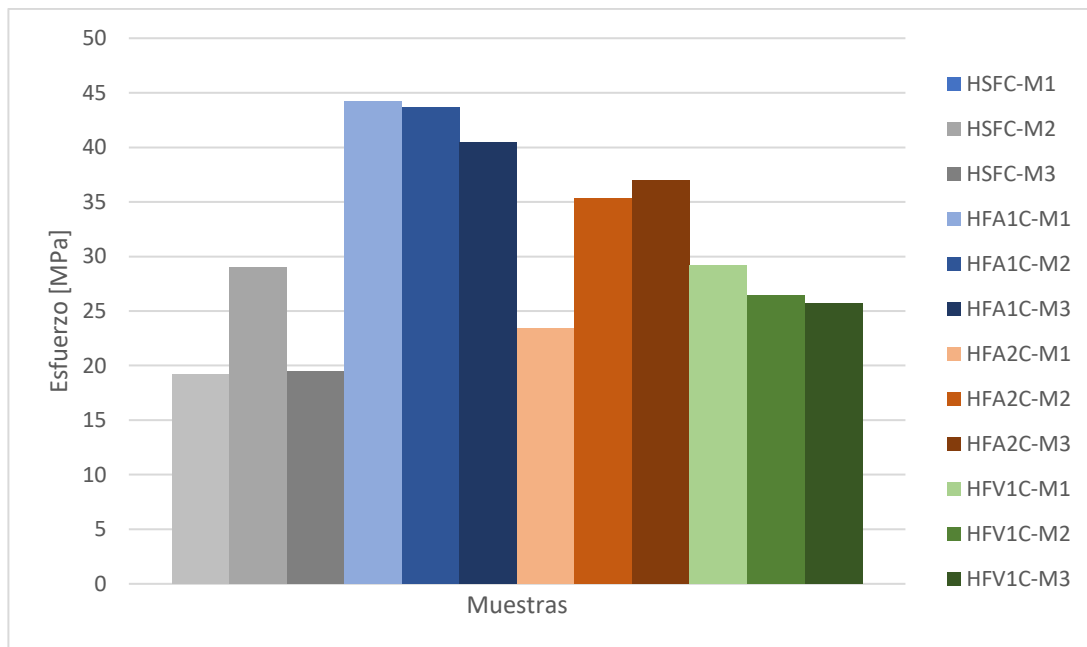
Gráfica 6: Esfuerzos máximos alcanzados por las muestras bajo ensayos de compresión para un curado de 7 días.

La *gráfica 7* muestra en conjunto los esfuerzos máximos alcanzados por todas las muestras con un tiempo de curado de 14 días, entregados anteriormente en la *Tabla 3*.



Gráfica 7: Esfuerzos máximos alcanzados por las muestras bajo ensayos de compresión para un curado de 14 días.

La *gráfica 8* muestra en conjunto los esfuerzos máximos alcanzados por todas las muestras con un tiempo de curado de 28 días, entregados anteriormente en la *Tabla 4*.



Gráfica 8: Esfuerzos máximos alcanzados por las muestras bajo ensayos de compresión para un curado de 7 días.

7. REFERENCIAS

- Choi, Seunghak & Taeho, Ha & Hossain, Mohammad & Han, Seungyeon & Yun, Kyong Ku. (diciembre de 2020). Comparison of Long-Term Strength Development of Steel Fiber Shotcrete with Cast Concrete Based on Accelerator Type. *Materials*. 13. DOI: 10.3390/ma13245599.
- Drover, Christopher & Villaescusa, Ernesto. (octubre de 2015). Performance of shotcrete surface support following Dynamic loading of minning excavations [Conferencia]. *Engineering Conferences International ECI Digital Archives: Shotcrete for Underground Support XII, Singapur*. http://dc.engconfintl.org/shotcrete_xii/3
- Jovicic, Vojkan & Šušteršič, Jakob & Vukelič, Željko. (noviembre de 2009). The application of fibre reinforced shotcrete as primary support for a tunnel in flysch. *Tunnelling and Underground Space Technology - TUNN UNDERGR SPACE TECHNOL*. Vol 24. 723-730. DOI: 10.1016/j.tust.2009.05.003.
- Külekçi, Gökhan. (enero de 2021). Comparison of Field and Laboratory Result of Fiber Reinforced Shotcrete Application. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. DOI: 10.3311/PPci.17033.
- Massone, Leonardo & Nazar, Francisco. (28 de marzo de 2018). Analytical and experimental evaluation of the use of fibers as partail reinforcement in shotcrete for tunnels in Chile. *Tunnelling and Underground Space Technology*. Vol. 77, p. 13-25). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.03.027>
- Martin, L.A., Seymour, B., Clark, C.C., Štěpán, M., Pakalnis, R.T., Roworth, M., & Cáceres, C. (2010). *An analysis of flexural strength and crack width for fiber-reinforced shotcrete used in weak rock mines*. <https://www.cdc.gov/niosh/mining/userfiles/works/pdfs/aaoff.pdf>
- Morton, Ellen & Thompson, A & Villaescusa, Ernesto. (enero de 2008). Static testing of shotcrete and membranes for mining applications [Conferencia]. *6th Int.*



Symp. On Ground Support in Mining and Civil Engineering Construction, Ciudad del Cabo, Sudáfrica.

https://www.researchgate.net/publication/276271130_Static_testing_of_shotcrete_and_membranes_for_mining_applications

Morton, Ellen & Thompson, A & Villaescusa, Ernesto (mayo de 2009). The performance of mesh, shotcrete and membranas for surface ground support. [Simposio]. *Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canadá.* <https://geogroup.utoronto.ca/wp-content/uploads/RockEng09/PDF/Session11/4022%20PAPER.pdf>

8. BIBLIOGRAFÍA

ASTM International. (2009). *ASTM C1116/C1116M-10a: Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete*. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA.

- ASTM International (28 de diciembre de 2011). *ASTM A820/A820M-06: Standard Specification for Steel Fibers for fiber-Reinforced Concrete*. K Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA.

-

BarChip INC (marzo de 2018). Mejores prácticas para probar el Concreto Proyectado reforzado con fibras. *BarChip Inc: The Synthetic Fibre Experts*. 2° edición. https://barchip.com/es/wp-content/uploads/2020/02/TN_Best-Practice-for-Testing-FRS_Spanish_sec.pdf

De ingenierías (24 de julio de 2019). *Diagrama esfuerzo deformación*. <https://deingenierias.com/el-acero/diagrama-esfuerzo-deformacion/>

Galleguillos Caro, T. (18 de marzo de 2010). *Modelamiento de Vigas de Hormigón con Fibras de Acero* [Tesis, Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103916>

García, Sergio (septiembre de 2014). Shotcrete - Guía chilena de Hormigón Proyectado. *Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile*. 2° edición. <https://ich.cl/documentos-shotcrete/2da-edicion-guia-chilena-de-hormigon-proyectado/>

Hurtubia, Neel (marzo de 2017). *Determinación de la capacidad de absorción de energía absorbida de hormigones reforzados con fibras mediante el ensayo de paneles EFNARC* [Tesis, Universidad Técnica Federico Santa María]. <http://hdl.handle.net/11673/14040>



Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (junio de 2006). *El concreto en la obra. Problemas, causas y soluciones: Pruebas de resistencia a la compresión del concreto*. <https://www.imcyc.com/ct2006/junio06/PROBLEMAS.pdf>

Instituto Nacional de Normalización (2009). *Norma chilena NCh 1037-2009: Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas*.

Mármol, Patricia. (2010). *Hormigones con fibras de acero: Características mecánicas* [Tesis, Universidad Politécnica de Madrid] https://oa.upm.es/4510/1/TESIS_MASTER_PATRICIA_CRISTINA_MARMOL_SALAZAR.pdf

PSI Concreto (5 de junio de 2020). *Fibra para concreto: guía de tipo y usos*. <https://psiconcreto.com/fibras-para-concreto-tipos-usos/>

Silva, O. (s.f.). *Las fibras en el concreto*. 360 en concreto. Recuperado en mayo del 2023. <https://360enconcreto.com/blog/detalle/las-fibras-en-el-concreto/>