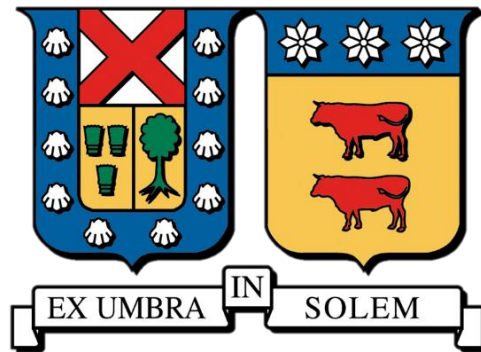


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO – CHILE



EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL ESPESOR EN PANELES DE HORMIGÓN REFORZADO
CON FIBRAS Y PROPUESTA DE EXPRESIÓN CORRECTIVA PARA LA CAPACIDAD DE
ABSORCIÓN.

Memoria de titulación presentada por:

CAMILO NICOLÁS LEFIHUALA GUTIÉRREZ

Memoria para optar al Título de

CONSTRUCTOR CIVIL

Profesor Guía

SERGIO CARMONA MALATESTA

Junio, 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): Memoria o trabajo de título; Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: Evaluación del efecto del espesor en paneles de hormigón reforzados con fibras y propuesta de expresión correctiva para la capacidad de absorción

Nombre del candidato(a): Camilo Nicolás Lefihuala Gutiérrez

Carrera / Grado: Construcción Civil

Campus: Casa Central Valparaíso ; **Departamento:** Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, SERGIO CARMONA MALATESTA, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

6 meses; 12 meses; 2 años; 3 años; 5 años; 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 3-7-2025

; Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 3-7-2025

; Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Agradecimientos

Quiero agradecer a Dios por darme fuerza y perseverancia en esta etapa.

A mi familia, por el apoyo constante, amor incondicional y aliento para superar las adversidades.

A mi profesor guía, Sergio Carmona M, por orientarme en mi memoria, brindarme su experiencia y conocimientos en mi proceso de formación.

Al equipo de LEMCO, por su disponibilidad y conocimientos, sobre todo a mis compañeros memoristas que me ayudaron en la fabricación de los paneles y los ensayos.

A mis amigos y amistades, los cuales forme durante el transcurso de mi etapa universitaria que me brindaron risas, buenos momentos y apoyo mutuo. Este logro es gracias a todos ellos.

RESUMEN

La capacidad del hormigón para absorber energía es un parámetro esencial en el diseño de estructuras subterráneas, pues permite evaluar su comportamiento frente a deformaciones extremas. Esta propiedad se ha mejorado con el uso de fibras, lo que ha llevado al desarrollo de normas como la EN 14488-5 y las recomendaciones de la guía EFNARC, que establecen ensayos en paneles cuadrados de dimensiones estándar. Sin embargo, dichas normas no consideran el efecto del espesor del panel sobre la capacidad de absorción de energía, lo que puede distorsionar los resultados y fomentar malas prácticas en obra.

Esta memoria tiene como objetivo analizar cómo varía la absorción de energía en función del espesor del panel reforzado con fibras sintéticas, utilizando el ensayo EN 14488-5. Para ello, se fabricaron paneles con espesores entre 100 mm y 115 mm, utilizando dos dosificaciones de fibra sintética: 4 kg/m³ y 6 kg/m³. Se analizaron los resultados obtenidos y se propusieron expresiones correctivas para normalizar los valores de absorción energética.

Los resultados mostraron una relación directa entre el espesor y la capacidad de absorción, permitiendo generar ecuaciones que corrigen este efecto. Estas expresiones permiten mejorar la precisión de los ensayos y ofrecen una herramienta práctica para aplicar en obras que empleen hormigón reforzado con fibras, contribuyendo a un diseño más seguro y estandarizado.

ABSTRACT

The energy absorption capacity of concrete is a critical parameter in the design of underground support structures, as it reflects the material's ability to withstand extreme deformation. This property has been significantly improved through the use of fiber reinforcement, leading to the development of international standards such as EN 14488-5 and the EFNARC guidelines, which prescribe tests using square panels of standardized dimensions. However, these standards do not account for the effect of panel thickness on energy absorption, which can result in misleading outcomes and poor construction practices when actual panel thickness deviates from the specified standard.

This thesis aims to analyze how the energy absorption of fiber-reinforced concrete panels varies with panel thickness, using the EN 14488-5 test method. Panels with thicknesses ranging from 100 mm to 115 mm were fabricated and tested, using two fiber dosages: 4 kg/m³ and 6 kg/m³. Based on the experimental results, corrective expressions were proposed to normalize the absorbed energy values.

The findings confirmed a direct correlation between panel thickness and energy absorption capacity. The proposed equations improve the accuracy of test interpretations and provide a practical tool for on-site applications using fiber-reinforced concrete, contributing to safer and more standardized structural design in underground construction.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. OBJETIVOS.....	9
2.1. Objetivo General.....	9
2.2. Objetivos Específicos	9
3. MARCO TEÓRICO	10
3.1. Hormigón proyectado o Shotcrete.	10
3.2 Fibras.	11
3.2.1. Fibras sintéticas.....	11
3.3. Tenacidad y absorción de energía.....	12
3.3.1. Capacidad de las fibras.....	13
3.4. Ensayos para determinar comportamiento HRF.....	14
3.4.1. Ensayo Flexión Panel Cuadrado	14
4. METODOLOGÍA.....	15
4.1. Plan de trabajo	15
4.2. Materiales de estudio	16
4.2.1. Hormigón Dosificado:.....	16
4.2.2. Aditivo AQUA 91Z:	16
4.2.3. Aditivo GAIA:.....	16
4.2.4. Fibra Sintética:	16
4.3. Método de fabricación de paneles.....	17
4.4. Método de ensayo	17
5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	19
5.1. Dosificación:	19
5.2. Hormigonado:	19
5.3. Curado:.....	19
5.4. Ensayo:.....	20
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS	21
6.1. Fibra sintética 4 kg/m ³ :.....	24
6.1.1. Panel de Espesor 100 mm:	24
6.1.2. Panel de Espesor 105 mm:	25
6.1.3. Panel de Espesor 110 mm:	26
6.1.4. Panel de Espesor 115 mm:	28
6.1.5. Modelación de ecuación para dosis de fibra 4 kg/m ³	30
6.2. Fibra sintética 6 kg/m ³ :.....	32

6.2.1. Panel de Espesor 100 mm:	32
6.2.2. Panel de Espesor 105 mm:	33
6.2.3. Panel de Espesor 110 mm:	35
6.2.4. Panel de Espesor 115 mm:	36
6.2.5. Modelación de ecuación para dosis de fibra 6 kg/m ³ :.....	39
6.3. Ecuación de relación entre espesor y energía absorbida:.....	42
7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	45
8. CONCLUSIONES.....	47
9. REFERENCIAS	48
10. ANEXOS:.....	49

1. INTRODUCCIÓN

La capacidad de absorción de energía es un parámetro de vital importancia en el diseño y análisis de los hormigones reforzados con fibras (HRF), utilizados principalmente en la construcción de estructuras destinadas al sostenimiento de obras subterráneas, como túneles, cavernas y proyectos mineros. Este parámetro es esencial porque permite evaluar la capacidad del material para resistir deformaciones significativas antes de fallar, asegurando un comportamiento dúctil y estable bajo condiciones extremas, tales como cargas dinámicas, impacto de rocas o movimientos del terreno. En este contexto, garantizar la fiabilidad de los métodos de ensayo utilizados para medir dicha capacidad es crucial para el diseño y la ejecución segura de este tipo de obras.

A nivel internacional, existen diversos métodos estandarizados para evaluar la capacidad de absorción de energía en hormigones reforzados con fibras. En Chile, los ensayos más comúnmente empleados son aquellos realizados en paneles cuadrados, siguiendo las disposiciones técnicas establecidas en la norma europea EN 14488-5 o las recomendaciones específicas de la organización EFNARC (European Federation of National Associations Representing for Concrete). Según estas referencias normativas, los paneles deben fabricarse con dimensiones específicas de 600×600×100 mm, permitiendo una tolerancia en el espesor. Mientras que la EN 14488-5 fija esta tolerancia en ± 5 mm, la recomendación de EFNARC es algo más flexible, permitiendo una variación de hasta ± 10 mm en el espesor.

Un aspecto fundamental en estos ensayos es que la capacidad de absorción de energía se determina calculando el área bajo la curva carga-deflexión central, hasta alcanzar una deflexión de 25 mm. Este enfoque se justifica porque la curva carga-deflexión central describe el comportamiento mecánico del panel sometido a esfuerzos, proporcionando una medida directa de la energía absorbida por el material bajo condiciones de flexión. No obstante, este método presenta ciertas limitaciones que han generado preocupaciones en la comunidad técnica y científica, especialmente cuando se aplican directamente los resultados sin considerar ciertos factores que pueden influir en la medición.

Uno de los problemas más relevantes es que ninguno de los procedimientos normativos mencionados establece un ajuste o corrección de la capacidad de absorción de energía en función del espesor del panel ensayado. Esto implica que, al ensayar un panel con un espesor superior al especificado, se obtendrán valores de capacidad de absorción de energía significativamente mayores. Esto ocurre porque el espesor influye directamente en la rigidez y resistencia global del panel, lo que resulta en una mayor capacidad para disipar energía antes de fallar. Como consecuencia, este fenómeno puede llevar a distorsiones importantes en el análisis de resultados, generando datos que no son comparables entre sí cuando los espesores no son homogéneos. Además, puede fomentar malas prácticas en las obras, donde se busque manipular el espesor para alcanzar resultados más favorables, lo que compromete la confiabilidad del diseño y el desempeño del material en condiciones reales.

Para abordar esta problemática, en la presente memoria se plantea un enfoque experimental con el objetivo de determinar un factor de corrección que permita ajustar los valores de capacidad de absorción de energía obtenidos en paneles cuadrados de diferentes espesores. Este factor tiene como propósito normalizar los resultados, de manera que puedan ser comparados de forma coherente con una especificación de referencia estándar. El proceso experimental consistirá en la fabricación y ensayo de paneles de hormigón reforzados con

fibras con espesores comprendidos entre 100 mm y 115 mm, abarcando un rango que refleje las tolerancias y variaciones posibles en las prácticas habituales.

Cada panel será ensayado para determinar su capacidad de absorción de energía mediante el método de curva carga-deflexión central. Que posteriormente, se analizarán los resultados obtenidos y se evaluará la influencia del espesor en el comportamiento energético del panel.

En base a los datos obtenidos, se propondrá un factor de corrección o una función matemática que permita ajustar los valores obtenidos en función del espesor real del panel. Este enfoque no solo contribuirá a mejorar la precisión de los ensayos y la calidad del diseño estructural, sino que también busca promover prácticas más rigurosas y estandarizadas en el uso de Hormigón con fibras en obras subterráneas.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Plantear un factor o relación basada en el espesor que permita normalizar los valores de la capacidad de absorción de energía obtenidos a través del ensayo de panel cuadrado para el hormigón diseñado.

2.2. Objetivos Específicos

- Determinar la capacidad de absorción de energía de paneles reforzados con distintos contenidos de fibras para distintos espesores.
- Establecer la variación que experimenta la capacidad de absorción de energía en función del panel ensayado.
- Proponer relaciones para normalizar la capacidad de absorción de energía, en función del panel ensayado.

3. MARCO TEÓRICO

El hormigón es un material fundamental en el rubro de la construcción. Los usos que se puede emplear son bastante diversos, revestimiento de pisos, levantamiento de edificios, y al ser aplicados con ciertas herramientas (mangueras de alta presión) pueden ser utilizados para la construcción y el sostenimiento de túneles.

Según “American Concrete Institute (ACI)”, define al SHOTCRETE como “Hormigón colocado por proyección neumática de alta velocidad desde una boquilla”. Es una técnica utilizada ampliamente en el sostenimiento de túneles debido a su capacidad para reforzar paredes y techos en obras subterráneas de manera eficiente y rápida.

3.1. Hormigón proyectado o Shotcrete.

La guía EFNARC, define al hormigón proyectado como una mezcla de cemento, áridos y agua proyectada de manera neumática desde una boquilla hacia un lugar de colocación para producir una masa densa y homogénea. Al cual normalmente se le incorpora aditivos y puede incluir fibras, adiciones o una combinación de estas.

Entre las principales ventajas del shotcrete, se destaca su capacidad de adherirse a superficies irregulares, siendo crucial en la construcción de túneles. Incluso, puede ser aplicado en superficies verticales como en techos sin la necesidad de encofrado, reduciendo costos y tiempos de construcción. Además, con la inclusión de equipos monitoreados y controlados a distancia, ha permitido que pueda ser utilizado en zonas de difíciles accesos, reduciendo riesgos de accidentes laborales.

A partir de la década del noventa, se empezó a implementar hormigón proyectado con fibras (HRF), que fue reemplazando con el tiempo la implementación de malla de acero como soporte para obras subterráneas, por las siguientes razones.

La capacidad de soporte logrado con HRF y pernos postensados excede significativamente el nivel de soporte logrado utilizando mallas y pernos. Menor riesgo de accidentes al no exponer al personal de trabajo a zonas no fortificadas. Mayor avance en el desarrollo de túneles y aumento de los equipos mecanizados para la proyección del hormigón. Además, se logra un mejor recubrimiento en la roca perforada, cubriendo la mayor cantidad de espacios, evitando la aparición de flujos de aire. El hormigón reforzado con fibras puede ser proyectado por dos vías.

- **Vía húmeda.**

Se procesa la dosificación de cemento, árido, fibras y agua, en una planta o mezcladora, para ser transportado a la bomba ubicada en la obra. La bomba transporta la dosificación por una manguera hasta la boquilla, agregándole aditivos acelerantes, siendo proyectados de manera neumática sobre la superficie a cubrir.

- **Vía seca.**

Consiste en dosificar el cemento con los áridos y fibras en una mezcladora siendo presurizada, para luego ser transportados por una manguera hacia la boquilla por un flujo de aire comprimido, en la que se le agrega el agua atomizada para hidratar la mezcla antes de ser proyectada sobre la superficie a reforzar.

3.2 Fibras.

Se define a las fibras como “filamentos finos y alongados en forma de haz, malla o trenza, de algún material natural o manufacturado que puede ser distribuido por medio de una mezcla de hormigón fresco” (ASTM 2023), que se incorporan con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas, aumentando la capacidad de absorber energía. Refuerzo que mejora la ductilidad permitiendo deformaciones sin fallar, característica requerida para obras subterráneas.

El Instituto de Concreto de Australia, señala que la fibra de refuerzo comprende de elementos cortos distribuidos uniformemente a lo largo del cuerpo de hormigón proyectado. Las fibras individuales suelen estar hechas de acero o polímeros, aunque en aplicaciones especializadas se ha utilizado vidrio o basalto resistente a los álcalis. La función estructural al agregar fibra a la mezcla es proporcionar capacidad de carga posterior a la fisura, no para aumentar la resistencia a tracción o a la flexión hormigón no fisurado. La tenacidad de un HRF es la capacidad de sostener y potencialmente redistribuir las cargas después del agrietamiento, lo cual se cuantifica en términos de resistencia a la flexión residual post- fisuración o energía absorbida. Un hormigón proyectado está diseñado para no agrietarse, sin embargo, la complejidad y naturaleza indeterminada de ciertos sistemas estructurales continúan con la posibilidad de subestimación de acciones de carga, por lo cual, la capacidad de carga posterior a la fisuración es necesaria para mantener la seguridad y servicios.

El artículo “modelo comparativo de las propiedades físico-mecánicas del shotcrete con contenido de fibras de acero y polipropileno (enero 2021)” señala que, las fibras de acero entregan una mayor capacidad de absorción de energía, debido a que las tensiones de tracción del hormigón son transferidas a las fibras por la unión duradera entre cemento y acero, mejorando el anclaje mecánico. También, retrasa el tiempo de fisuración inicial y aumenta la carga necesaria para producir la primera fisura. No obstante, el mayor problema que presenta esta fibra es la corrosión que puede obtener, así como su alta temperatura de fundición, lo que ocasiona más fisuración en la estructura.

3.2.1. Fibras sintéticas.

Las fibras sintéticas son comúnmente de polipropileno para el hormigón proyectado y deben cumplir con la norma ASTM D7508/D7508M. Por su composición, poseen una mejor resistencia a la alcalinidad del hormigón y el óxido, junto con poseer menos peso y menor desgaste al proyectarse. No obstante, presentan degradación bajo los rayos UV que dependiendo del material que están fabricadas, las fibras comienzan a perder sus propiedades físicas y mecánicas a temperaturas superiores a 50°C o desintegrarse completamente a partir de los 160°C.

La fibra sintética al tener una menor densidad, permite una mayor incorporación de números de fibra junto con una mayor manipulación de los equipos de proyección. Lo que permite menor dosificación de kilos de fibra/m³ de hormigón, menor desgaste de bombas y mangueras, y esencialmente un menor coste de m³ de hormigón en comparación a las fibras de acero.

El adicionar fibras sintéticas produce un efecto puente controlando, deteniendo las grietas reduciendo la concentración de tensiones alrededor de estas. “Modelo comparativo de las propiedades físico-mecánicas del shotcrete con contenido de fibras de acero y polipropileno

(enero 2021)” señala que las fibras mejoran la resistencia al endurecimiento y el módulo elástico del concreto, de acuerdo a la cantidad y longitud de la fibra permitiendo su aplicación en túneles y galerías mineras, la relación óptima de la fibra agregada oscila entre el 0,25% y 0,9%, se debe escoger un correcto valor con el objetivo de detener el desgaste del shotcrete y protegerlo de la corrosión ante condiciones climáticas severas. Además, reduce el rebote que causa la pérdida de fibra y el engrosamiento de las capas de hormigón.

Las fibras sintéticas no presentan un carácter estructural en comparación a las fibras de acero, pues no modifican las propiedades mecánicas del hormigón, más bien, al adicionar fibras estructurales produce un efecto sinérgico en el control de las micro fisuras, que con el paso del tiempo terminarían resultando en macro fisuras.

3.3. Tenacidad y absorción de energía.

La tenacidad se define como, la capacidad que tiene un material para poder absorber energía o acumularla hasta alcanzar la rotura, reflejando la ductilidad y resistencia residual del material. En Hormigón reforzado con fibras, las fibras actúan como puentes de unión de fisura y disipación de energía, mejorando la capacidad de deformación ante las cargas, retrasando la propagación y aumento de grietas (Banthia & Trottier, 1995). La tenacidad puede considerarse como el inverso de la fragilidad, teniendo conocimiento que un material frágil no posee una amplia capacidad de absorber energía a partir de su fisuración, teniendo una rotura abrupta.

El índice de tenacidad propuesto por Henegar en 1978 y contemplado en la recomendación ACI 544.2R en 1989, fue el primer valor adimensional utilizado para caracterizar los hormigones reforzados con fibra de acero, basado en la energía de ensayos de flexión a carga estática. Entregando noción de la gran importancia que tiene la absorción de energía para poder reconocer y caracterizar el comportamiento que tendrá el hormigón. El empleo de ensayos de flexión para determinar la tenacidad del hormigón se debe a la dificultad que existe para cuantificar la tenacidad ante los esfuerzos de tracción con ensayos de tracción directa o uniaxial.

La absorción de energía es fundamental en materiales sometidos a cargas de impacto o dinámicas. El uso de fibras en el hormigón permite la disipación de energía a medida que ocurre la propagación de la fisura, donde la resistencia residual aportada por las fibras mejora el comportamiento del material en aplicaciones estructurales críticas (ACI 544,2022).

Un hormigón convencional tiene un comportamiento frágil-elástico, que al alcanzar su máxima resistencia se produce la formación y propagación de fisuras críticas llegando a una falla abrupta. No obstante, el adicionar fibras (metálicas, sintéticas u otro) permite incrementar la resistencia residual después de la fisuración, se requiere una mayor carga post-fisuración para que ocurra una deformación. Retrasando la propagación de fisuras al distribuir las tensiones de manera más uniforme, limitando la concentración de tensiones alrededor de la fisura. Además, mejora la ductilidad al permitir mayores deformaciones ante la falla gracias a la contribución mecánica de las fibras. (Concreto Reforzado con fibras, SIKA)

3.3.1. Capacidad de las fibras.

Una característica importante al momento de escoger una fibra es el anclaje que tenga con la matriz del concreto, pues la fibra es la que se encargara de resistir la fisuración, debiendo ser capaz de soportar los esfuerzos de tensión, llevando a que la composición, dimensiones y forma de la fibra asegure un buen anclaje y adherencia con el hormigón.

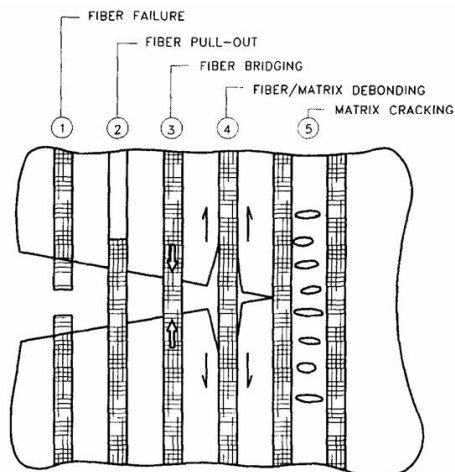


Figura 1: Comportamiento de las fibras ante la propagación de una fisura (Fiber-reinforced concrete: an Overview after 30 years of Development, 1997)

La capacidad de las fibras para absorber energía está determinada por diversos factores que determinan el comportamiento efectuado por las cargas y su resistencia post-fisuración, las cuales son:

Geometría y dimensiones de la fibra

La longitud y el diámetro influyen al momento de absorber energía, una alta relación longitud-diámetro está asociada a una buena eficiencia de las fibras. Esta relación es denominada “Aspecto de la fibra”, no obstante, esta relación presenta un máximo para la eficiencia, cuando la relación supera los 100 produce un mal trabajo de las fibras o una distribución no uniforme. Ante esto se ha determinado que la relación recomendada no debe superar los 100.

Distribución y orientación de las fibras

Una distribución uniforme y orientación adecuada de las fibras asegura un comportamiento homogéneo y optimiza la energía absorbida. Cuando las fibras están orientadas paralelamente en el sentido de respuestas de las cargas, la eficiencia estructural es más alta, al contrario, si la orientación es de manera perpendicular, las fibras no presentan respuesta de reacción y el hormigón se comporta como si no tuviera fibras. Siendo hasta la fecha un problema al momento de construcción.

Los mecanismos de absorción descritos por Ronald F. Zollo para la falla del hormigón son los siguientes:

- Desprendimiento de la Fibra: Pérdida de adherencia de la fibra con la matriz, no se desarrolla la resistencia última por lo que no absorbe una gran cantidad de energía

- Alargamiento de la Fibra: La fibra fluye disipando la energía sin fracturarse, pero no alcanza la resistencia última.
- Falla de la Fibra: La fibra absorbe la energía llegando a su resistencia máxima, resultado de su buena adherencia con la matriz de hormigón.
- Falla de matriz de hormigón: Existe una buena adherencia entre la fibra y la matriz, no obstante, la fibra supera la resistencia de está provocando que falle antes la matriz
- Fisuración de la matriz hormigón: Se presentan diferentes fallas en la matriz, y al igual que el alargamiento de la fibra, existe disipación de energía entre ambas.

3.4. Ensayos para determinar comportamiento HRF.

Con la finalidad de caracterizar el comportamiento que posee un hormigón reforzado con fibras, se han propuestos ensayos y normas por distintas instituciones en el mundo. A nivel nacional se implementan ensayos de procedencia europea y norteamericana para caracterizar las propiedades mecánicas, algunos de los ensayos que se realizan son: El ensayo de flexión de panel cuadrado, pudiendo ser realizando, siguiendo la norma EN 14488-5 o en base a la guía EFNARC, el ensayo flexión de viga según la norma europea EN 14651 y el ensayo Barcelona según la norma EN 83515.

3.4.1. Ensayo Flexión Panel Cuadrado

De acuerdo con la norma EN 14488-5, se especifica el método para determinar la respuesta de carga/deflexión de una muestra de losa para calcular la capacidad de absorción de energía hasta una deflexión específica. Para realizar este método, se debe fabricar un espécimen cuadrado con dimensiones de 600 mm x 600 mm y con un espesor de 100⁺⁵ mm siguiendo las recomendaciones de curado según la norma EN 12390-2 y manteniéndose en cámara húmeda hasta los 28 días para realizar la prueba.

El panel debe ser apoyado sobre un soporte cuadrado rígido de 20±1 mm de grosor y una dimensión interna de 500±2 mm x 500±2 mm para soportar el panel. La carga efectuada sobre el panel debe ser de un bloque cuadrado de acero con una superficie de contacto de 100±1 mm x 100±1 mm, colocado al centro de la cara de llenado del panel, el desplazamiento de la carga se controlará a una velocidad constante de 1±0,1 mm/min finalizando la carga cuando se logre una deformación central del panel sobre los 30 mm.

A partir de la curva carga/deflexión, se extrae la curva de energía absorbida mediante la integración del área, que a mayor carga de absorción mayor es la capacidad que el hormigón con fibra de soportar cargas en estado de fisuración.

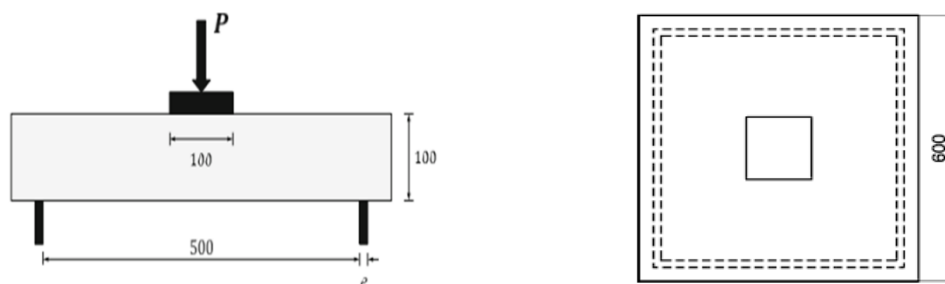


Figura 2: Configuración ensayo de panel cuadrado de acuerdo con la norma EN 14488-5.

4. METODOLOGÍA

4.1. Plan de trabajo

En la presente investigación se propone fabricar paneles de hormigón con dos dosificaciones de fibras sintéticas, cuyas dimensiones serán de 600x600 mm, en series de distintos espesores, siendo:

- Serie 1: Paneles reforzados con espesor de 100 ± 1 mm
- Serie 2: Paneles reforzados con espesor de 105 ± 1 mm
- Serie 3: Paneles reforzados con espesor de 110 ± 1 mm
- Serie 4: Paneles reforzados con espesor de 115 ± 1 mm

1. Preparación de Paneles de Hormigón:

En el laboratorio de LEMCO, se elaborarán paneles de hormigón reforzados con fibra en dosificaciones de cuatro y seis kilogramos por metro cúbico. Se utilizarán moldajes de acero con dimensiones internas de 600 mm x 600 mm. Para obtener espesores variados, se adaptarán los moldajes mediante listones adicionales con la finalidad de obtener espesores entre 100 mm a 115 mm.

El hormigón empleado será de tipo G20, en presentación predosificada en bolsas de 25 kg, al que se añadirán aditivos químicos para mejorar sus propiedades. Los paneles se desmoldarán tras el tiempo de fraguado y serán colocados en una cámara de humedad para curado en condiciones controladas hasta ser ensayos.

2. Ensayos de Absorción de Energía:

Los paneles serán evaluados en la máquina de carga/deflexión, bajo los parámetros de la norma EN 14488-5. Los ensayos serán realizados con la asistencia y supervisión del personal de LEMCO, quienes guiarán en el uso de la maquinaria de ser necesario.



Figura 3: Configuración de ensayo de panel cuadrado en laboratorio LEMCO de acuerdo con la norma EN 14488-5.

3. Análisis de Datos:

Se efectuará un análisis estadístico de los resultados para determinar la relación entre el espesor del panel y su capacidad de absorción de energía. Esto incluirá el cálculo de la dispersión y el coeficiente de variación, con el objetivo de establecer una correlación precisa entre espesor y absorción de energía en el hormigón reforzado con fibra.

4.2. Materiales de estudio

4.2.1. Hormigón Dosificado:

El hormigón utilizado para el estudio corresponde a un PRESEC H02 HOMCRETE fabricado por SIKA, que presenta las siguientes características:

- Tamaño máximo del grano 9,5 mm
- Rendimiento de $12 \pm 0,2$ lts de mezcla por saco de 25 kg
- Proporción de 2,5 - 3,0 lts de agua por saco de 25 kg

4.2.2. Aditivo AQUA 91Z:

El AQUA 91Z es un Hiperplastificante en base a Nanosílicie lo que permite una alta capacidad de reducción de agua.

- Se utiliza diluido en el agua de amasado del hormigón en dosis de 0,3% a 1,5% referido al peso del cemento.
- Su densidad es de $1,117 \pm 0,002$ g/ml.
- Aditivo tipo F según la norma ASTM C494

4.2.3. Aditivo GAIA:

El GAIA es un adición de cemento en base a nano sílice para concretos de altas prestaciones:

- Se utiliza en dosis de 0,5% a 3,0% en base al peso del cemento.
- Su densidad es de $1,031 \pm 0,02$ g/ml.
- Un pH de 5 ± 1 .
- Cumple como aditivo superplastificante tipo F, según NCh 2182.

4.2.4. Fibra Sintética:

La fibra utilizada para el estudio está fabricada en base a polipropileno virgen y reciclado de la empresa BarChip Inc. Fibra de clase II, para uso estructural en hormigón, argamasa y lechada de cemento, que cumple con la EN 14889-2 y la ASTM C 1116 – Tipo III.

- Resistencia a la tensión de 610 MPa
- Módulo de Young de 10 GPa
- Anclaje de relieve continuo
- Punto de fusión entre 160 – 170 °C
- Longitud de 48 mm
- 36.500 unidades de fibra por kilo

4.3. Método de fabricación de paneles

Se señala las etapas de fabricación de los paneles para la investigación, desarrollados en el laboratorio de hormigón de la Universidad.

- Humectar la betonera.
- Disolver los aditivos en los baldes de agua total.
- Agregar el 50% de bolsas de hormigón a la betonera.
- Agregar el 50% del agua total a la betonera.
- Revolver la mezcla por 3 minutos.
- Agregar el 50% restante de bolsas de hormigón.
- Agregar el 50% restante de agua total.
- Revolver la betonera hasta lograr homogenizar la mezcla.
- Agregar las fibras a la betonera y mezclar entre 5 a 10 min.
- Verter la mezcla en una herramienta de transporte (carretilla)
- Depositar la mezcla comenzando a partir del centro del panel y luego llenar esquinas del panel. A mismo tipo se debe revolver la mezcla para evitar segregación.
- Vibrar la mezcla por medio del vibrado de inversión de ser requerido, se debe procurar que ingrese de manera vertical, sin tocar el fondo del panel y retirar lentamente.
- Nivelar y alisar la superficie del panel.
- Instalar una arpillera humectada y luego cubrir con una membrana de plástico para disminuir la pérdida de humedad si se requiere.
- Luego de dos días, retirar el moldaje de panel para ser llevado a la cámara húmeda, donde se mantendrá por al menos 26 días para poder realizar los ensayos requeridos.

4.4. Método de ensayo

Los métodos para obtener la energía que puede absorber los paneles de hormigón con fibras son dos. Utilizando la Norma Europea EN 14488-5 o mediante la “Especificación Europea para Hormigón Proyectado EFNARC”.

Esta investigación se realizó mediante las indicaciones de la Norma EN 14488-5, el panel de ensayo tendrá unas dimensiones de 600 mm x 600 mm con espesores variados a partir de los 100 mm hasta los 115 mm, será apoyado en los 4 bordes y se aplicará una carga central a través de una superficie de contacto. La cara de llenado debe quedar hacia arriba durante el ensayo, aplicando la carga en la misma dirección a la proyección del hormigón.

El panel será soportado por un marco cuadrado de 100 mm de grosor y 500 ± 2 mm x 500 ± 2 mm de dimensión interna a la que se le agrega un marco de acero de 20 mm de grosor y de un espesor de 8 mm que estará en contacto con el panel.

La velocidad de deformación en el punto medio debe ser de 1,0 mm/min equivalente a 16,6 $\mu\text{m/s}$ la cual estará controlada por un transductor que monitorea el desplazamiento el pistón de carga a partir del momento que está en contacto con el panel, esta carga estará controlada

por el equipo MCC-8 MultiTest por medio de un circuito cerrado conectado a un PC permitiendo revisar la carga/deflexión del panel y modificar los parámetros de velocidad.



Figura 4: Adaptación de instrumentos para realizar el ensayo según la norma EN 14488-5.

Este ensayo entrega la curva carga-deformación, que con esto se debe calcular el diagrama de energía que entrega el trabajo realizado en función del desplazamiento. La capacidad de absorción de energía en julios se expresa como el área bajo la curva carga-deformación entre 0 y 25 mm de deformación.

5. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los datos para la memoria son experimentales, obtenidos junto a otros memoristas y funcionarios en LEMCO, en base a probetas que se desarrollaron en este laboratorio.

El autor participo activamente en las faenas de hormigonado y desmolde de los paneles con fibra sintética, concluyendo con la ejecución de estos ensayos en la maquinaria MCC8.

5.1. Dosificación:

La dosificación del hormigón se ajustó para trabajar con 168 lts., con la finalidad de que la betonera trabaje en óptimas condiciones, y que se complete los paneles con un solo vaciado de hormigón por betonera. Se detalla en las siguientes tablas (tabla 1 y tabla 2), las dosificaciones empleadas por contenido de fibra.

Tabla 1: Dosificación de betonera para dosis de 4 kg/m³ de Fibra Sintética

Fibra Sintética 4 kg/m ³		
Bolsas Cemento	14	Un
Agua total	42	lts
GAIA	0,84	kg
AQUA 91Z	0,28	kg
Fibra sintética	0,672	kg

Tabla 2: Dosificación de betonera para dosis de 6 kg/m³ de Fibra Sintética

Fibra Sintética 6 kg/m ³		
Bolsas Cemento	13,83	un
Agua total	30	lts
GAIA	0,83	kg
AQUA 91Z	0,55	kg
Fibra sintética	1,0	Kg

5.2. Hormigonado:

El hormigonado se realizó en las instalaciones del LEMCO en conjunto con otros memoristas de la carrera de Construcción Civil, donde se utilizó una mezcladora de eje vertical de 200 litros, confeccionando las series de paneles en diferentes amasadas.

Se utilizaron moldajes desmontables de acero existentes en LEMCO, aplicando un aceite desmoldante para evitar adherencia del hormigón al moldaje, los moldajes son nivelados al momento de hormigonar, luego son cubiertos con un polietileno con la finalidad que no pierda humedad. Luego de desmoldarlos a las 48 horas se llevan a la cámara de curado, para ser ensayados en la fecha correspondiente.

5.3. Curado:

El curado es realizado en una cámara de humedad que se encuentra en LEMCO, dentro de las instalaciones de la Universidad, donde se mantienen a una temperatura y humedad controladas, hasta la fecha que serán ensayados.

5.4. Ensayo:

Los ensayos son realizados en LEMCO USM, en el área de Hormigón, mediante un bastidor de carga y celda de carga conectada a una consola MCC8 Multitest, que verifica la carga mediante un sistema hidráulico de control en bucle cerrado de 100 kN de capacidad carga máxima, bajo control de deformación. La deflexión se midió con ayuda de un LVDT de 50 mm de alcance lo que permite mantener la velocidad deflexión constante.



Figura 5: Compilado del proceso de fabricación de paneles

6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

Se realizó la confección de 47 paneles en total, la cantidad de paneles fabricados para cada espesor respecto a la dosis de fibras sintéticas se detalla en la tabla 3.

Tabla 3: Cantidad de paneles fabricados por dosis de fibra y espesor

Cuantía de Fibras	Espesor de Paneles	Cantidad de Paneles
4 kg/m ³ de Fibra	100	3
	105	3
	110	3
	115	3
6 kg/m ³ de Fibra	100	2
	105	3
	110	3
	115	3

Se realizó la elaboración de cilindros según la norma NCh170 “Hormigón – Requisitos Generales”, con el propósito de ver la resistencia que adquiere el hormigón con fibras después de la fabricación.

Con esta finalidad se utilizó la dosis de 4 kg/m³ de hormigón, fabricando un total de 4 cilindros que fueron ensayados en distintos días, los resultados son mostrados en la tabla 4 y se grafica la carga obtenida en los distintos días (grafico 1).

Tabla 4: Datos de probetas cilíndricas ensayadas a distintos días

4 kg de Fibra Sintética				
Mezcla	2 días	7 días	30 días	34 días
Carga [kN]	281	354	559	610
Masa [kg]	12,6	12,7	12,6	12,5
Resistencia [MPa]	15,9	20,0	31,6	34,6

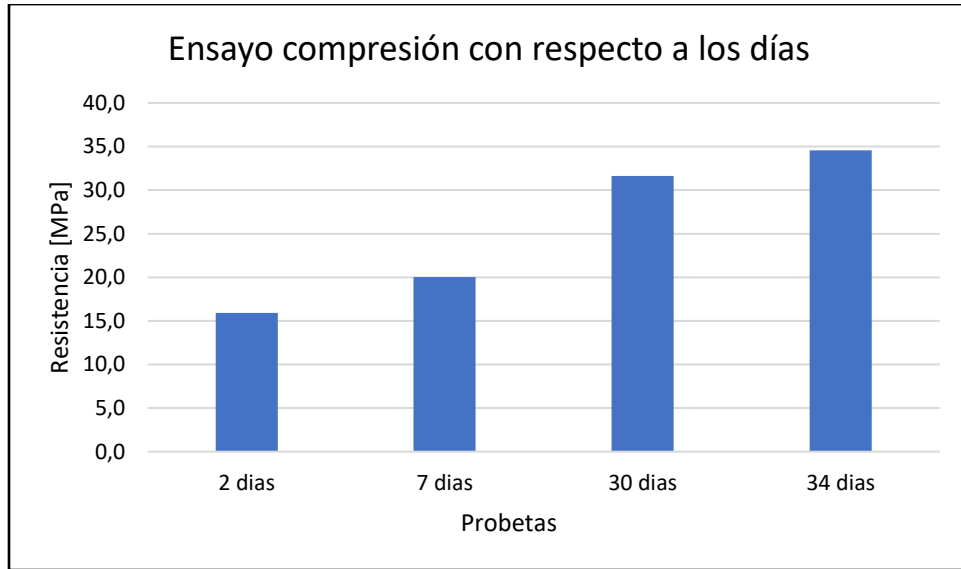


Gráfico 1: Resistencia de probetas cilíndricas ensayadas a distintos días.



Figura 6: Montaje de probeta para ensayo de compresión.

Las resistencias alcanzadas en los primeros días son muy bajas en comparación a diseños de hormigón proyectado, pues la resistencia que se espera adquirir en los primeros dos días para un hormigón proyectado debe superar los 400 kN en general, resistencia que solo fue superada después de los 30 días desde la fabricación. Además, presentó un aumento de resistencia a los 34 días de un 8%.

Para la dosis de 6 kg/m³ de fibra, los cilindros confeccionados fueron ensayados a los 28 días siguiendo las recomendaciones de la norma NCh 170, los datos obtenidos son mostrados en la tabla 5 y en el grafico 2.

Tabla 5: Datos de probetas cilíndricas ensayadas para dosis de 6 kg/m³

6 kg de Fibra Sintética				
Mezcla	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Carga [kN]	774	783	769	775
Masa [kg]	12,6	12,7	12,8	-
Resistencia [MPa]	43,8	44,3	43,5	-

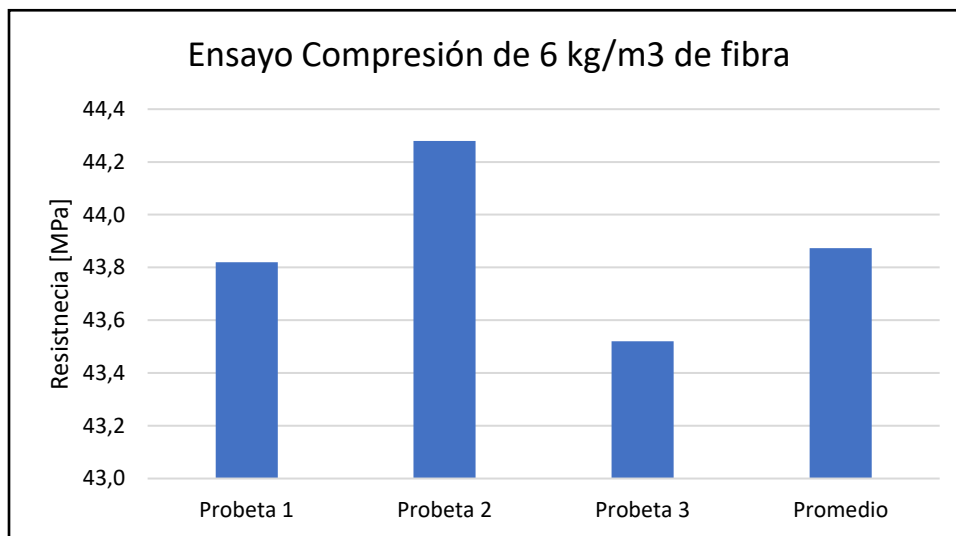


Gráfico 2: Resistencia compresión de probetas cilíndricas con dosis de 6 kg/m³ de fibra



Figura 7: Resultado de la compresión de las probetas cilíndricas

6.1. Fibra sintética 4 kg/m³:

A continuación, se presentan los espectros de las curvas carga/deflexión y Energía Absorbida/deflexión por cada espesor analizado. Se confecciono 3 paneles para cada espesor a analizar, obteniendo un total de 12 paneles para una dosis de 4 kg/m³ de fibra sintética.

6.1.1. Panel de Espesor 100 mm:

A continuación, se presentan los gráficos carga/deflexión (grafico 3) y energía/deflexión (grafico 4) que se obtuvieron tuvieron del ensayo de paneles con espesor de 100 mm, los paneles mostraron diferentes saltos en la zona de fluencia del hormigón al ser sometidos a la carga, debido al asentamiento del panel con el marco.

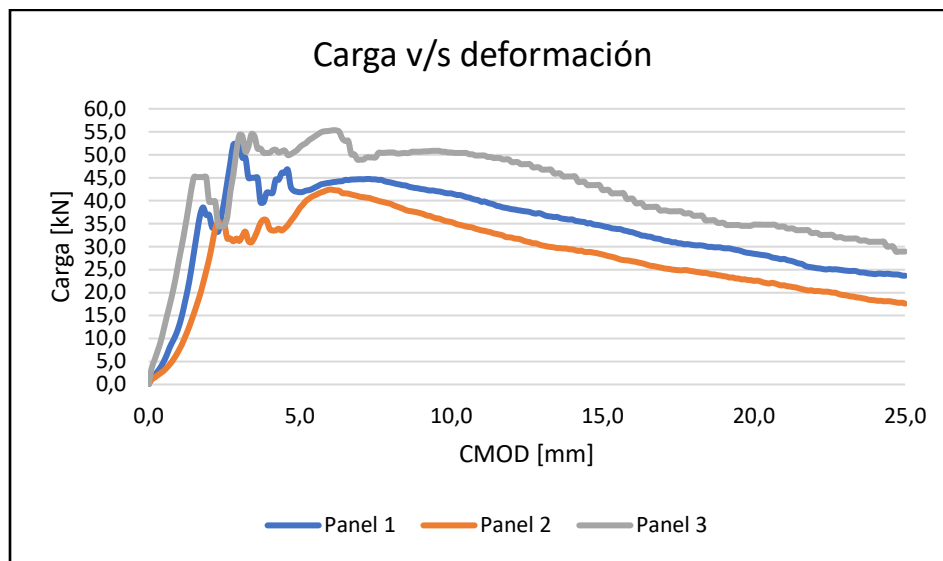


Gráfico 3: Carga-deformación para paneles de 100 mm

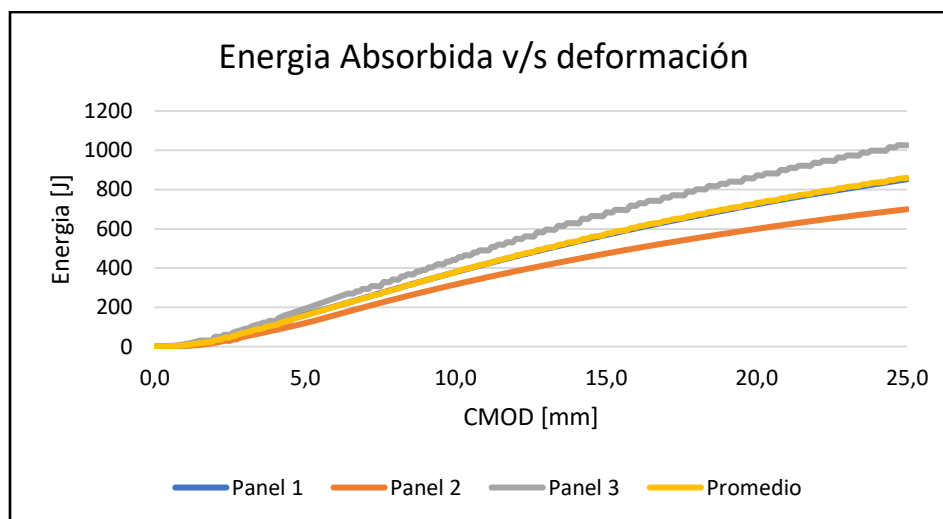


Gráfico 4: Energía-deformación para paneles de 100 mm

La energía promedio de los paneles con 100 mm de espesor, para una dosis de fibra sintética de 4 kg/m³, es de 859 Joule. El coeficiente de variación de los datos obtenidos es de un 19%, un valor mayor a lo esperado. Sin embargo, es menor al 30% de dispersión, por lo que el

valor promedio es representativo para el conjunto de datos. Se detalla los resultados de la serie en la tabla 6.

Tabla 6: Resumen de resultados para paneles de 100 mm

Esesor	100 mm		
Panel	1	2	3
Carga Max [kN]	53,0	42,5	55,4
Energía [J]	852	699	1025
Promedio [J]	859		
CV	19%		
Factor Aumento	0%		

6.1.2. Panel de Espesor 105 mm:

En la serie de paneles con espesor de 105 mm, se destaca el comportamiento del panel 1, el cual presentó un aumento de carga a partir de los 5 mm de deformación, se visualiza en el grafico 5. Siendo en el panel con menor capacidad de absorción en comparación a los demás paneles (grafico 6).

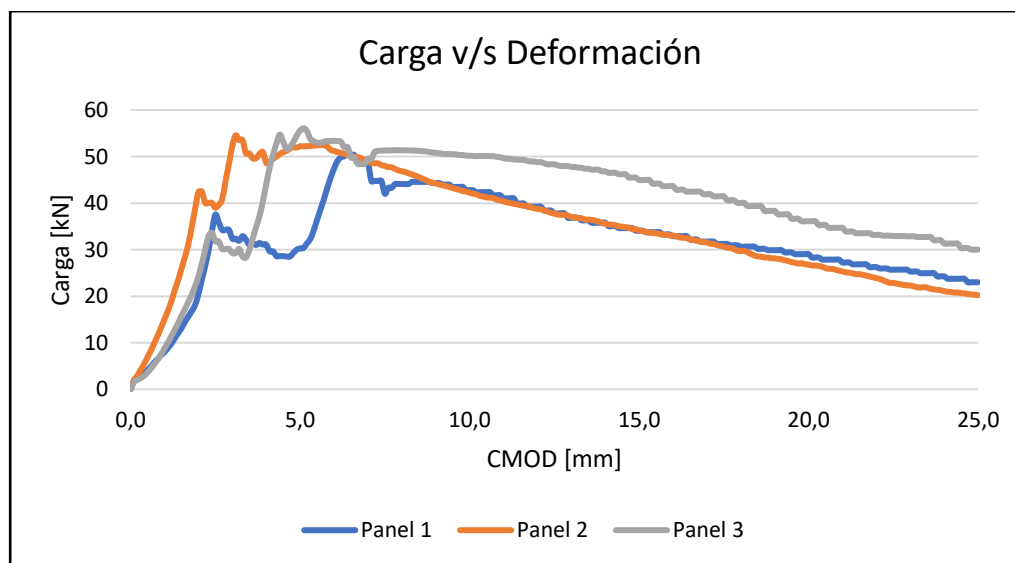


Gráfico 5: Carga-deformación para paneles de 105 mm

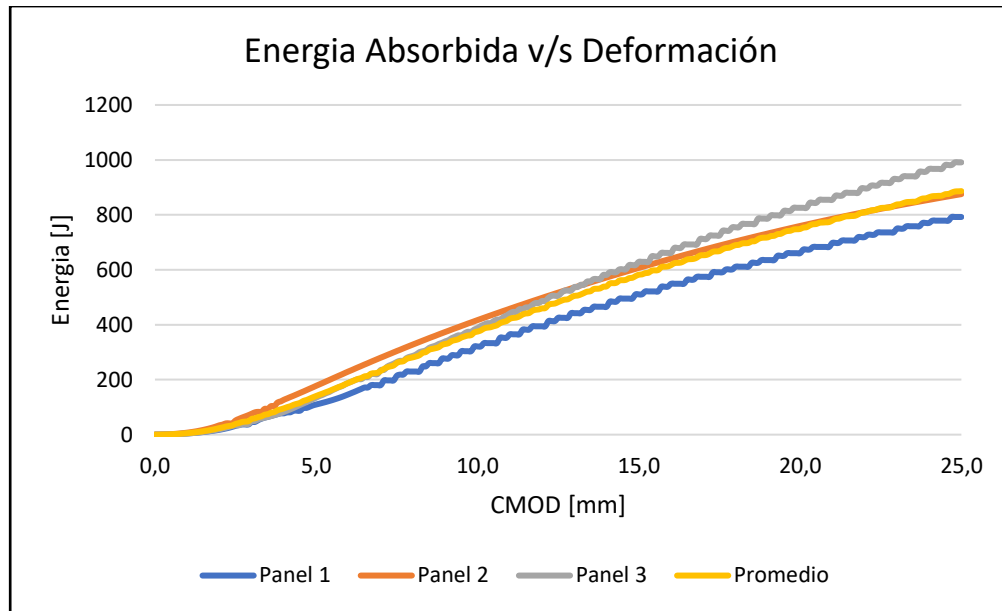


Gráfico 6: Energía-deformación para paneles de 105 mm

En la serie de paneles, se obtiene un promedio de energía absorbida de 886 Joule para paneles de espesor de 105 mm. Logrando de aumento de energía absorbida del 3%, en relación con el promedio de energía para la serie de 100 mm de espesor con la misma dosificación de fibras (4 kg/m^3), y un coeficiente de variación de un 11% entre los datos. Se especifica en la tabla 7.

Tabla 7: Resumen de resultados para paneles de 105 mm

ESPESOR	105 mm		
Panel	1	2	3
Carga Max [kN]	50,7	54,7	56,2
Energía [J]	792,2	875,5	991,0
Promedio [J]	886		
CV	11%		
Factor Aumento	3%		

6.1.3. Panel de Espesor 110 mm:

Los resultados de los ensayos de carga/deformación y energía absorbida/deformación son presentados en los gráficos 7 y 8 respectivamente. El detalle de los gráficos es adjuntado en (Anexos A).

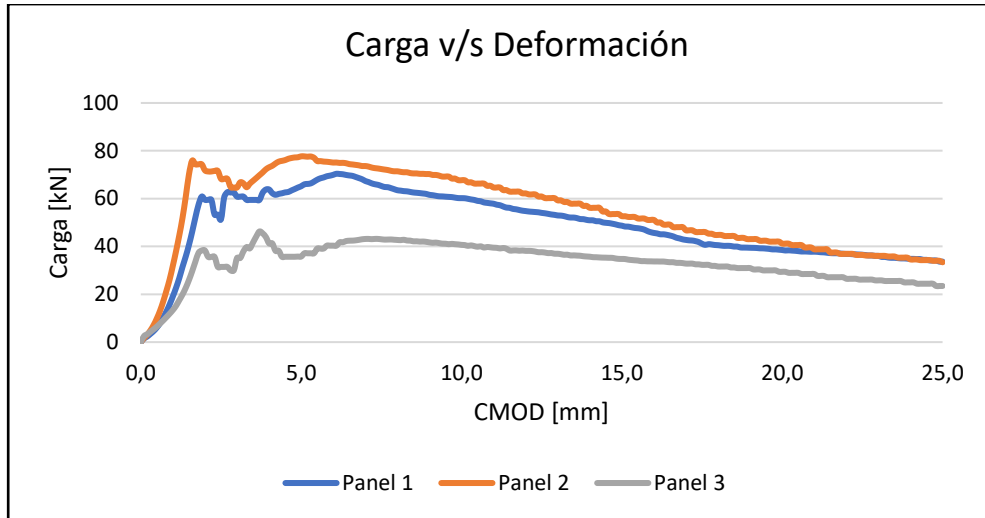


Gráfico 7: Carga-deformación para paneles de 110 mm

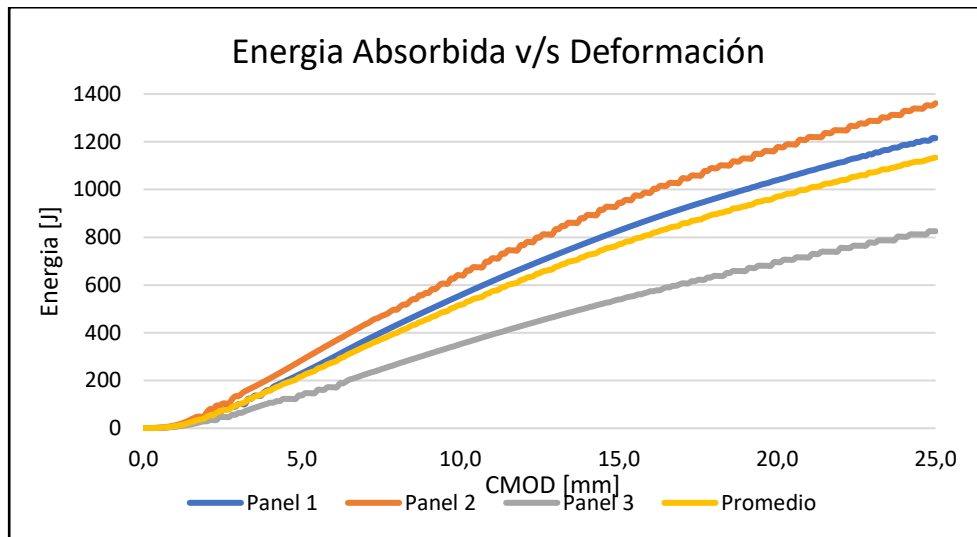


Gráfico 8: Energía-deformación para paneles de 110 mm

En la serie de paneles, el panel #3 presentó la menor carga y energía absorbida, incluso menor a los valores obtenidos por los paneles con espesor de 100 mm. Obteniendo un promedio de energía absorbida de 1134 Joule y un factor de aumento de energía del 32% con relación a la absorbida con los paneles de 100 mm. Sin embargo, el coeficiente de variación es de 24% para la serie. Los datos son mostrados en la tabla 8.

Tabla 8: Resumen de resultados para paneles de 110 mm

ESPESOR	110mm		
Panel	1	2	3
Carga Max [kN]	70,4	77,8	46,6
Energía [J]	1215	1362	825
Promedio [J]	1134		
CV	24%		
Factor Aumento	32%		

6.1.4. Panel de Espesor 115 mm:

A continuación, se presenta los resultados de carga/deformación y energía absorción/deformación, que tuvieron los paneles con espesor de 115 mm (grafico 9 – 10). Se adjunta los datos de los gráficos en (Anexos A).

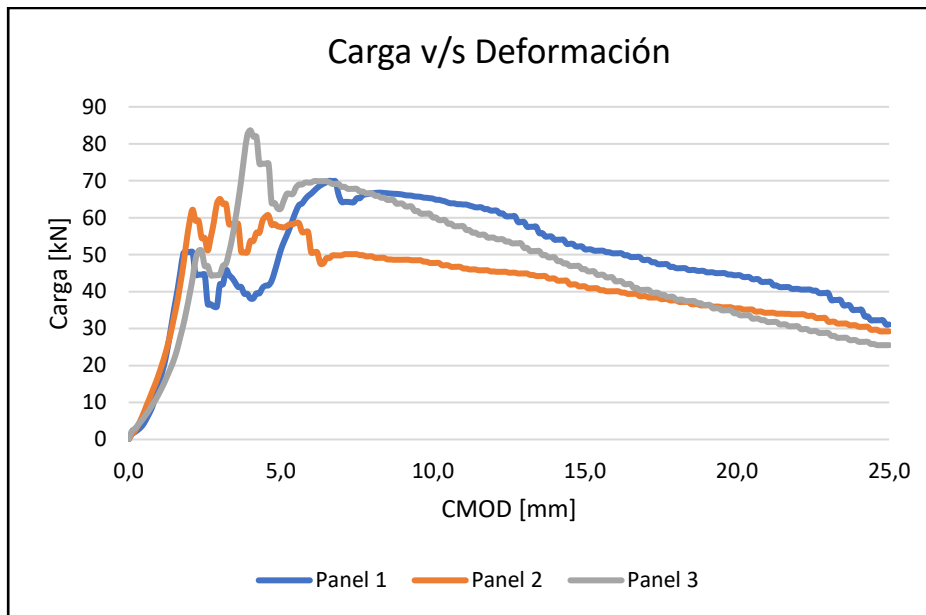


Gráfico 9: Carga-deformación para paneles de 115 mm

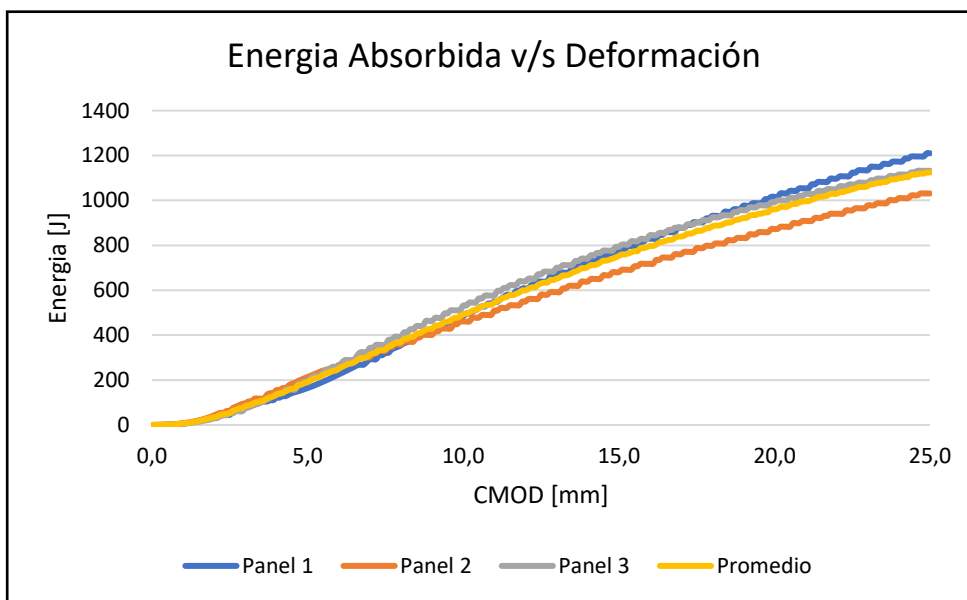


Gráfico 10: Energía-deformación para paneles de 115 mm

Los paneles con espesor de 115 m, se logró un incremento de energía absorbida cercano del 31%, en relación con los paneles de 100 mm de espesor. Obteniendo una energía promedio de 1124 Joule, pero, siendo menor a la energía promedio de la serie de paneles de 110 mm. El coeficiente de variación para la serie de los datos es del 8% entregando una buena confiabilidad, se especifica en la tabla 9.

Tabla 9: Resumen de resultados para paneles de 115 mm

ESPESOR	115 mm		
Panel	1	2	3
Carga Max [kN]	70,0	65,1	83,7
Energía [J]	1210,1	1031,2	1132,0
Promedio [J]	1124		
CV	8%		
Factor Aumento	31%		



Figura 8: Compilado de los paneles ensayados con dosis de 4 kg/m^3 de fibra

6.1.5. Modelación de ecuación para dosis de fibra 4 kg/m³

Se presenta las curvas promedio de la energía absorbida se cada serie de espesores fabricadas (grafico 11), donde se aprecia que los espesores de 110 mm y 115 mm lograron una mayor cantidad de energía absorbida, superando los 900 Joule para 25 mm de deformación. Además, los resultados de la energía absorbida de cada panel son mostrados en el grafico 12, siendo el panel 2 de 110 mm de espesor el que mayor energía absorbe.

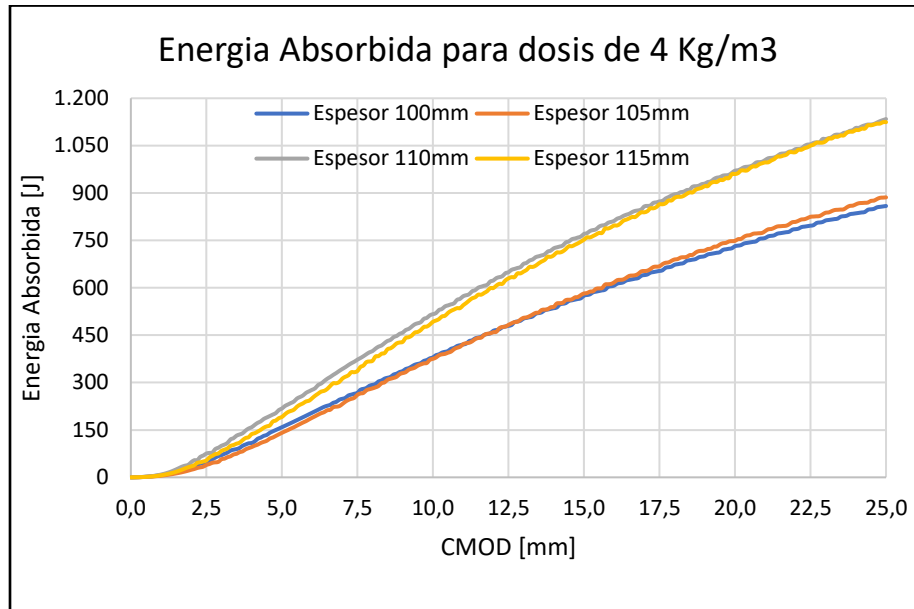


Gráfico 11: Energía absorbida promedio-deformación por espesor

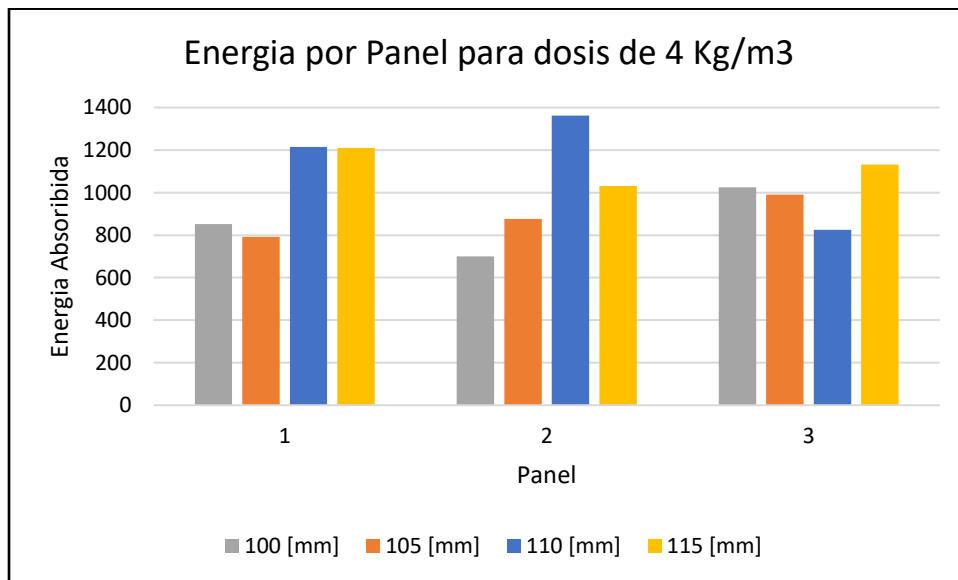


Gráfico 12: Comparación de energía absorbida por panel para cada espesor

Con los datos e información recopilada, se elaboró la tabla 11 y el grafico 13, requeridos para determinar la ecuación de absorción de energía con relación a los espesores de los paneles para la dosis de fibra (4 kg/m³).

Tabla 11: Resumen de datos por espesor para dosis de 4 kg/m³

ESPESOR	100 mm			105mm			110mm			115mm		
Panel	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Carga Max [kN]	53	42	55	51	55	56	70	78	47	70	65	84
Energia [J]	852	699	1025	792	876	991	1215	1362	825	1210	1031	1132
Promedio [J]	859			886			1134			1124		
CV	19%			11%			24%			8%		
Factor Aumento	0%			3%			32%			31%		

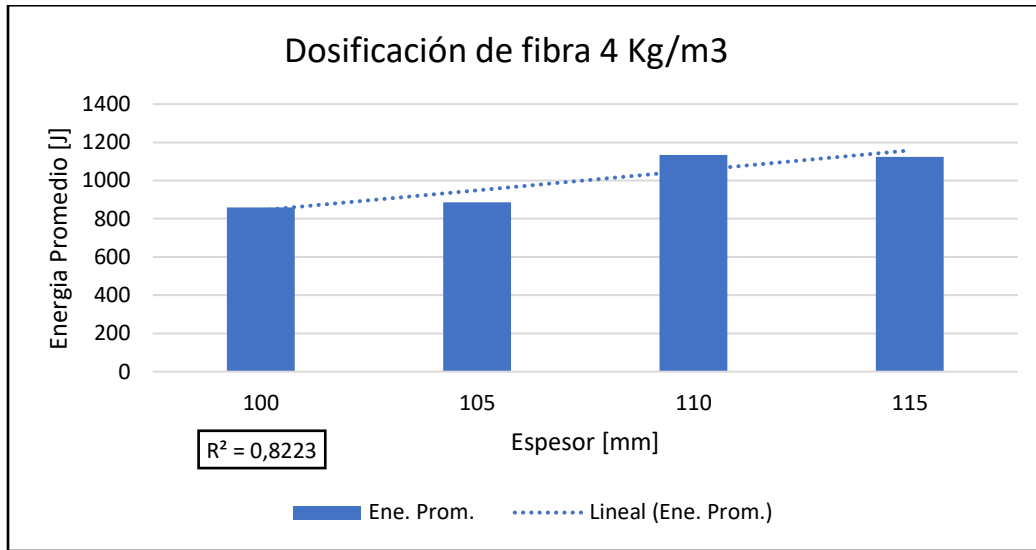


Gráfico 13: Resumen de datos de energía por espesor para dosis de 4 kg/m³

1. Cálculo de medias

$$\bar{U} = \frac{100 + 105 + 110 + 115}{4} = 107,5$$

$$\bar{Y} = \frac{859 + 886 + 1134 + 1124}{4} = 1001$$

2. Cálculo de pendiente

$$m = \frac{\sum(U_i - \bar{U}) * (Y_i - \bar{Y})}{\sum(U_i - \bar{U})^2}$$

$$m = 20,86$$

3. Cálculo de Intersección de recta:

$$b = \bar{Y} - m * \bar{U}$$

$$b = -1241,7$$

4. Ecuación de Recta:

$$Y(h) = 20,86 * h - 1241,7 [J] \quad (1)$$

Donde:

h: El espesor de los paneles en mm

Y: La energía absorbida por los paneles de espesor h en Joule

Por medio de este procedimiento, se obtiene que la regresión lineal para la ecuación es del 0,82. Lo cual sugiere una buena relación entre el aumento de los espesores y la energía absorbida, aunque el modelo no es perfecto, permite sacar predicciones aproximadas dentro del rango de datos proporcionados.

Al aplicar la propuesta de ecuación (1), se obtiene una diferencia máxima, entre los valores obtenidos implementando la ecuación propuesta y lo datos experimentales, de un 7,2%. No obstante, este margen solo se obtiene en los valores intermedios, a medida que se utiliza un mayor espesor la diferencia disminuye (tabla 12).

Tabla 12: Comparación de energía absorbida para dosis de 4 kg/m³

Panel	Resultados Experimental		Resultado Teórico	
	Joule	C.V	Joule	Diferencia
100	859	19%	844	1,7%
105	886	11%	949	7,0%
110	1134	24%	1053	7,2%
115	1124	8%	1157	2,9%

6.2. Fibra sintética 6 kg/m³:

Para esta dosificación de fibra, se fabricó un total de 11 paneles, donde se confeccionó solo dos paneles de espesor 100 mm debido a la falta del aditivo GAIA, cambiando la cantidad de litros de mezcla producidos por betonera para mantener la misma dosificación de hormigón con fibra sintética.

6.2.1. Panel de Espesor 100 mm:

Para esta serie se fabricó solo dos paneles, debido a la falta de aditivo GAIA reduciendo los litros de mezcla de hormigón para mantener la misma dosificación. Ambos paneles, presentaron un aumento de carga luego de la fractura del hormigón, debido al trabajo de las fibras, estos resultados se pueden ver en los grafico (14 y 15) y en (Anexos B).

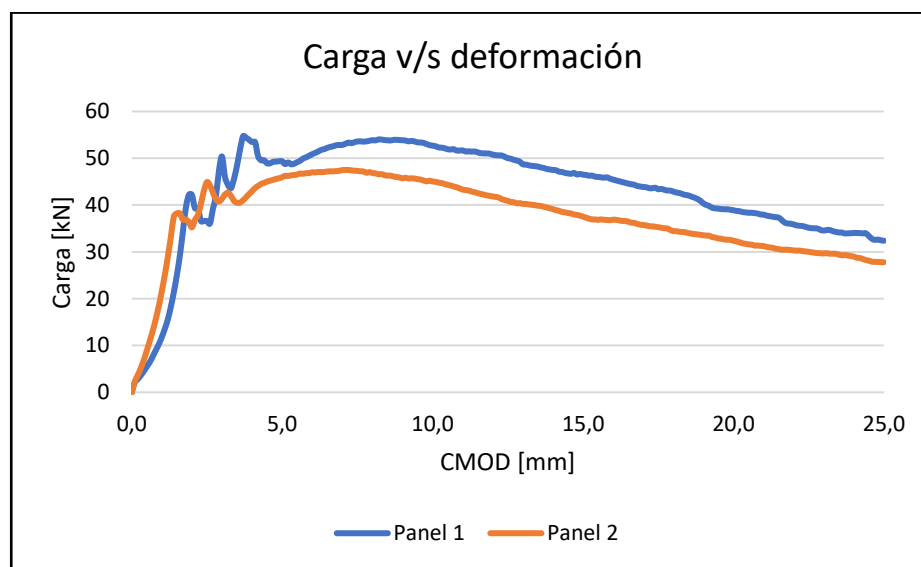


Gráfico 14: Carga-deformación para paneles de 100 mm con 6 kg/m³

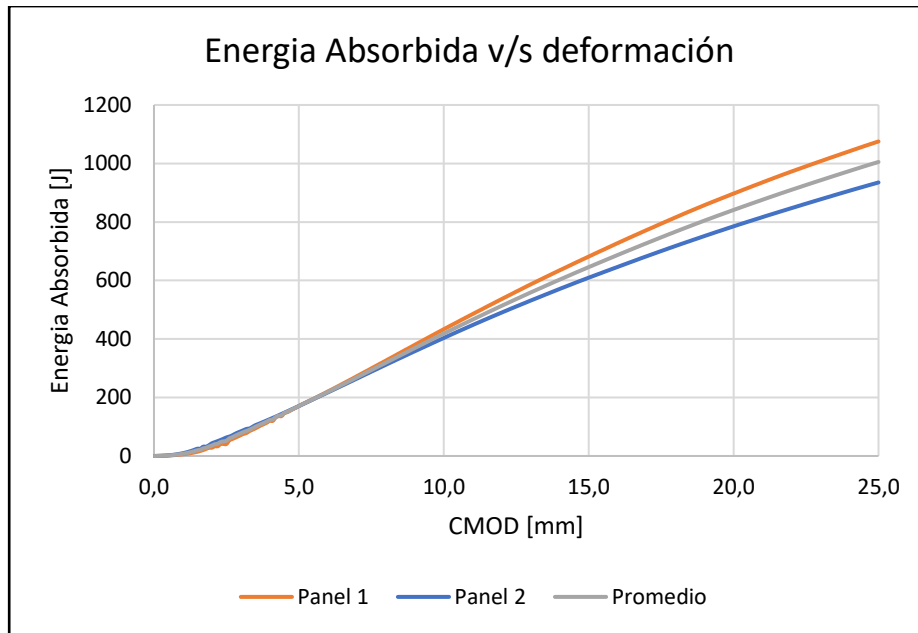


Gráfico 15: Energía-deformación para paneles de 100 mm con 6 kg/m³

La energía promedio de la serie de paneles con espesor de 100 mm, para una dosis de fibra sintética de 6 kg/m³, es de 1005 Joules a los 25 mm de deflexión. El coeficiente de variación de los datos obtenidos es de un 10%, habiendo una buena consistencia en los datos entregando una confiabilidad y precisión (tabla 13)

Tabla 13: Resumen de datos para paneles de 100 mm con 6 kg/m³

ESPESOR	100 mm		
Panel	1	2	3
Carga Max [kN]	55,1	47,6	
Energía [J]	1075,2	935,1	
Promedio [J]	1005		
CV	10%		
Factor Aumento	0%		

6.2.2. Panel de Espesor 105 mm:

A continuación, se presenta los resultados de la serie de paneles de 105 mm en las curvas de carga (Grafico 16) y absorción de energía (Grafico 17), incluyendo la curva promedio de la energía absorbida de la serie involucrada. La información de los datos es adjuntada en los (Anexos B).

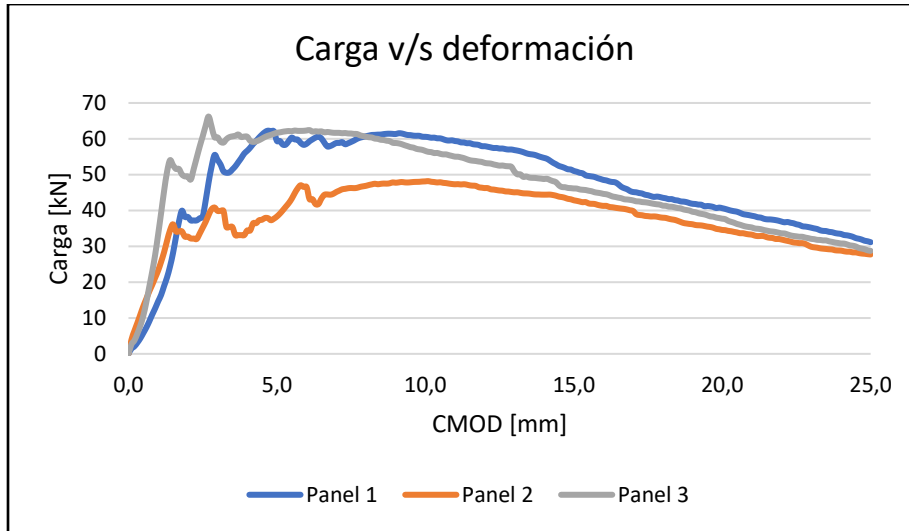


Gráfico 16: Carga-deformación para paneles de 105 mm con 6 kg/m^3

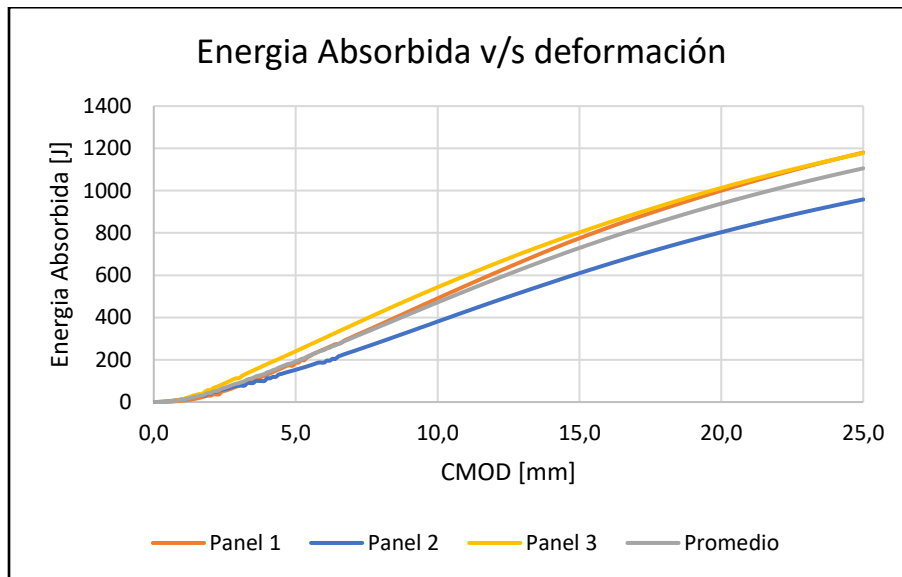


Gráfico 17: Energía-deformación para paneles de 105 mm con 6 kg/m^3

La serie presentó, un promedio de energía absorbida de 1105 Joules. Logrando un factor de aumento de la energía absorbida del 10% en relación con el promedio de paneles de 100 mm de espesor con la misma dosificación (6 kg/m^3). Se especifica las cargas máximas y energías absorbida de cada panel en la tabla 14.

Tabla 14: Resumen de datos para paneles de 105 mm con 6 kg/m^3

ESPESOR	105mm		
Panel	1	2	3
Carga Max [kN]	62,4	48,2	66,4
Energía [J]	1180,0	958,4	1178,0
Promedio [J]	1105		
CV	12%		
Factor Aumento	10%		

6.2.3. Panel de Espesor 110 mm:

En la serie de paneles con espesor de 110 mm, los paneles mostraron un leve aumento de carga luego de agrietarse, destacando el panel #3 que, pese a tener una menor carga al momento de agrietarse, presentó un aumento de la carga producto del trabajo de las fibras logrando una carga mayor en comparación al momento de fracturarse, se especifica los resultados en los gráficos (18 y 19).

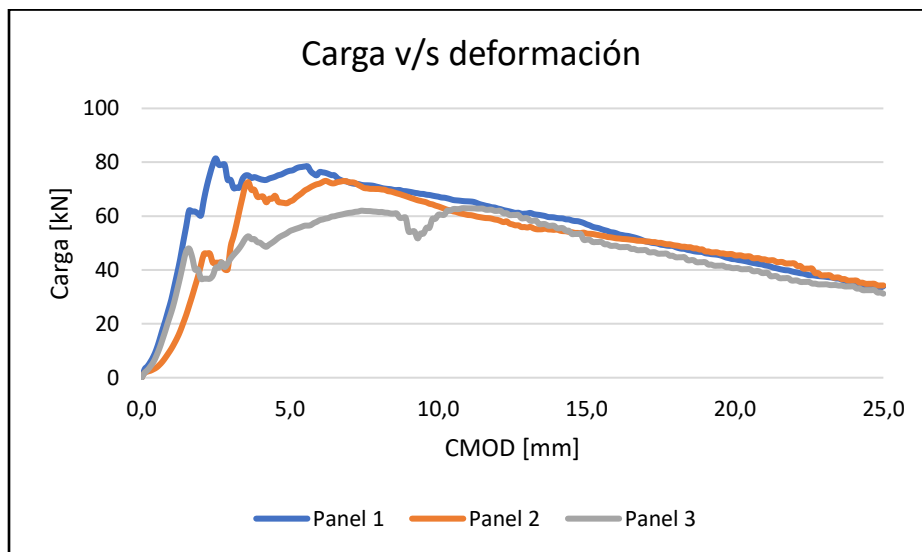


Gráfico 18: Carga-deformación para paneles de 110 mm con 6 kg/m^3

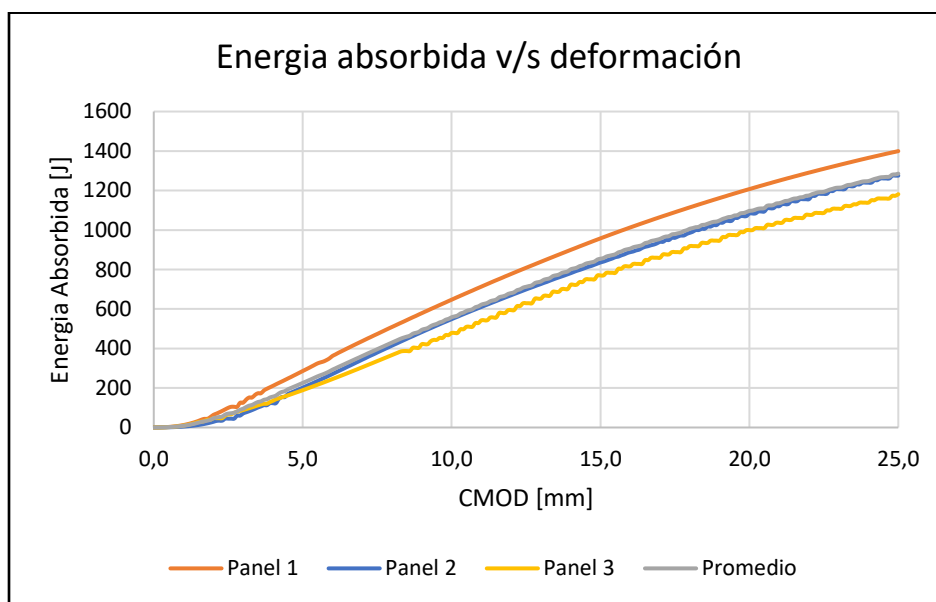


Gráfico 19: Energía-deformación para paneles de 110 mm con 6 kg/m^3

Los resultados de los paneles presentaron un promedio de energía absorbida de 1286 Joule para la serie. Logrando un factor de aumento de la energía absorbida del 28% en relación con la serie de 100 mm de espesor, los valores de energía absorbida de cada panel estuvieron cercano entre ellos, con un coeficiente de variación del 9%, verificado la confiabilidad y consistencia de los datos, se detalla los resultados los paneles en la tabla 15.

Tabla 15: Resumen de datos para paneles de 110 mm con 6 kg/m³

ESPESOR	110 mm		
Panel	1	2	3
Carga Max [kN]	81,5	73,1	62,9
Energía [J]	1399,7	1275,4	1181,4
Promedio [J]	1286		
CV	9%		
Factor Aumento	28%		

6.2.4. Panel de Espesor 115 mm:

Se presenta a continuación, el resultado del ensayo sobre los paneles con espesor de 115 mm, los paneles lograron soportar cargas cercanas a los 100 kN, que, si bien indica una buena resistencia del hormigón, para el ensayo no son fortuitas producto que la carga máxima que puede ejecutar la maquina es de 100 kN.

Por cual se debió interrumpir el ensayo para el panel número 2, producto que estaba llegando a la carga máxima y aun no presentaba indicios de fractura a deflexión, llevando a descartar los datos para el análisis de energía absorbida.

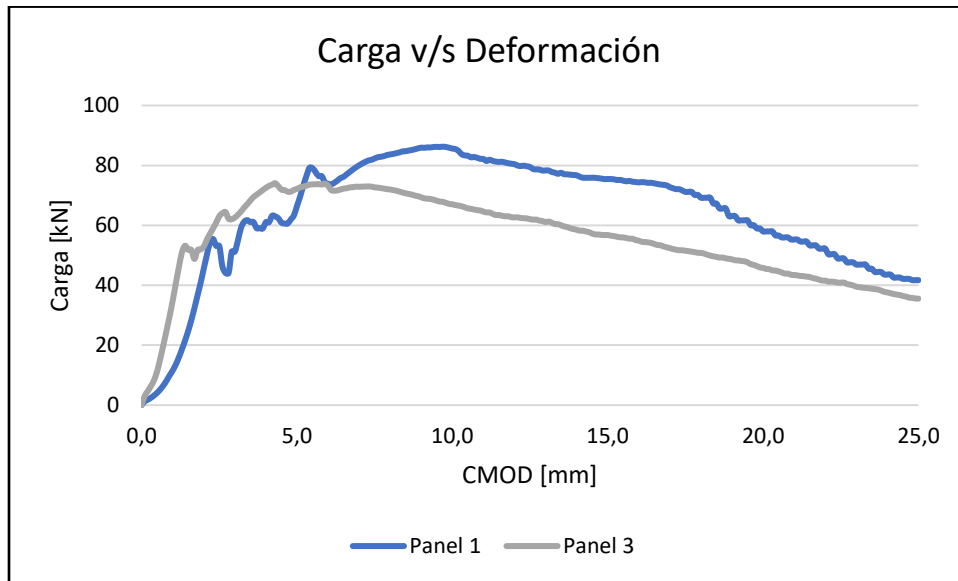


Gráfico 20: Carga-deformación para paneles de 115 mm con 6 kg/m³

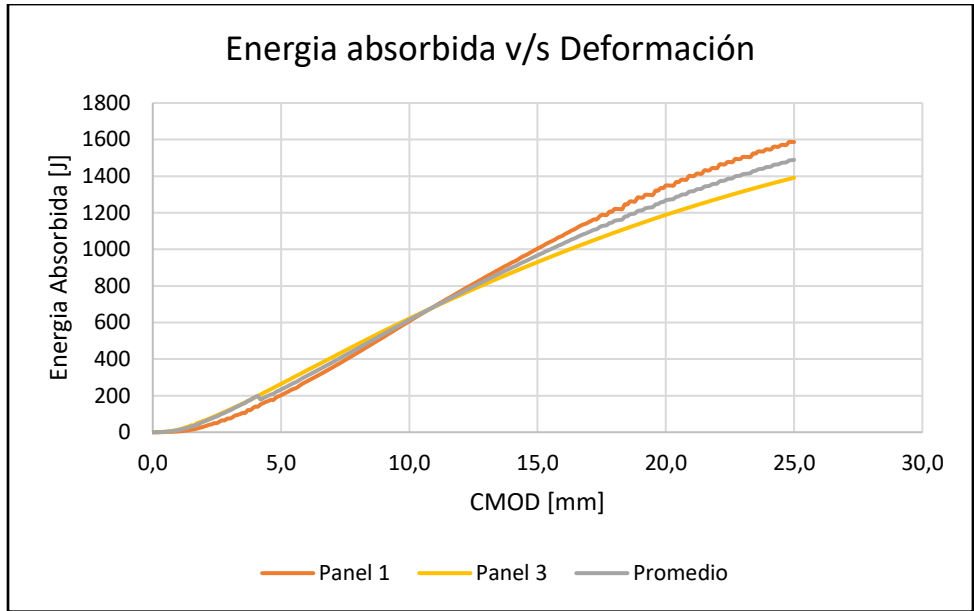


Gráfico 21: Energía-deformación para paneles de 115 mm con 6 kg/m³

Con los paneles de 115 mm de espesor, se aprecia un incremento cercano del 48% de la energía absorbida. La serie de paneles presentó una energía promedio de 1486 joule, no obstante, se descartó para este análisis los datos del panel #2, por haber quedado inconcluso en ensayo al no haber obtenido una deflexión de 25 mm (gráficos 20 y 21). Al descartar el panel, se logró obtener un coeficiente de variación del 9%, se detalla los datos de los paneles en la tabla 16.

Tabla 16: Resumen de datos para paneles de 100 mm con 6 kg/m³

ESPESOR	115mm		
Panel	1	2	3
Carga Max kN	86,3	96,8	74,2
Energía J	1586,4		1391,3
Promedio J	1489		
CV	9%		
Factor Aumento	48%		



Figura 10: Compilado de los paneles ensayados con dosis de 6 kg/m^3 de fibra

6.2.5. Modelación de ecuación para dosis de fibra 6 kg/m³:

Se presenta las curvas promedio de la Energía absorbida para cada espesor de panel respecto a la deflexión (grafico 21), donde se aprecia que los espesores de 110 mm y 115 mm lograron una mayor cantidad de energía absorbida, superando los 1200 J para 25 mm de deformación. Siendo el espesor de 115mm el panel que mayor energía absorbe, respecto a ser sometida a una carga de deflexión.

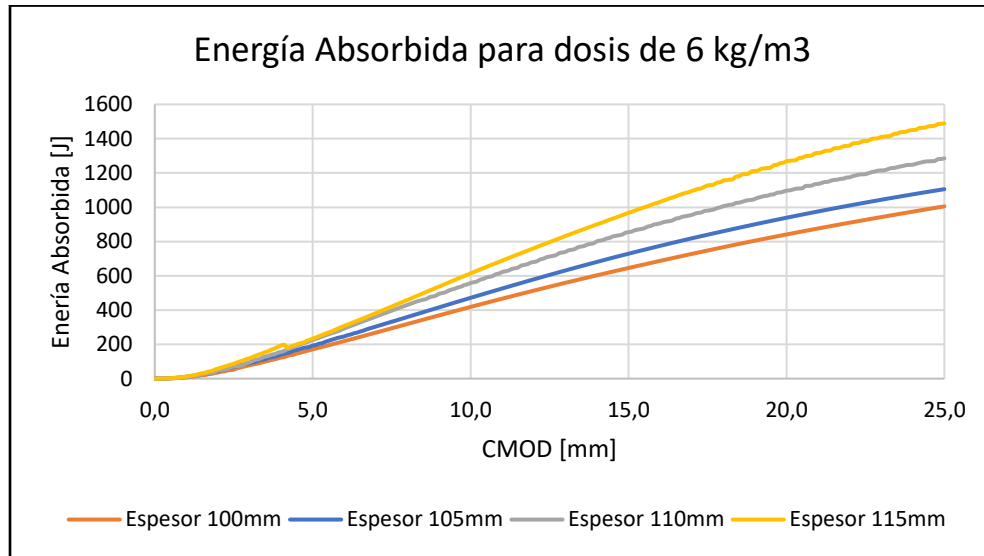


Gráfico 22: Energía absorbida v/s deformación para paneles con 6 kg/m³ de fibra

Se presenta en el grafico 22, la energía absorbida que tuvo cada panel de la muestra estudiada, apreciando la diferencia que existe entre los espesores de 100 mm y 105 mm con los paneles de espesor de 110 mm y 115 mm. Además, que no hubo un tercer panel para los espesores de 110 mm y 115 mm.

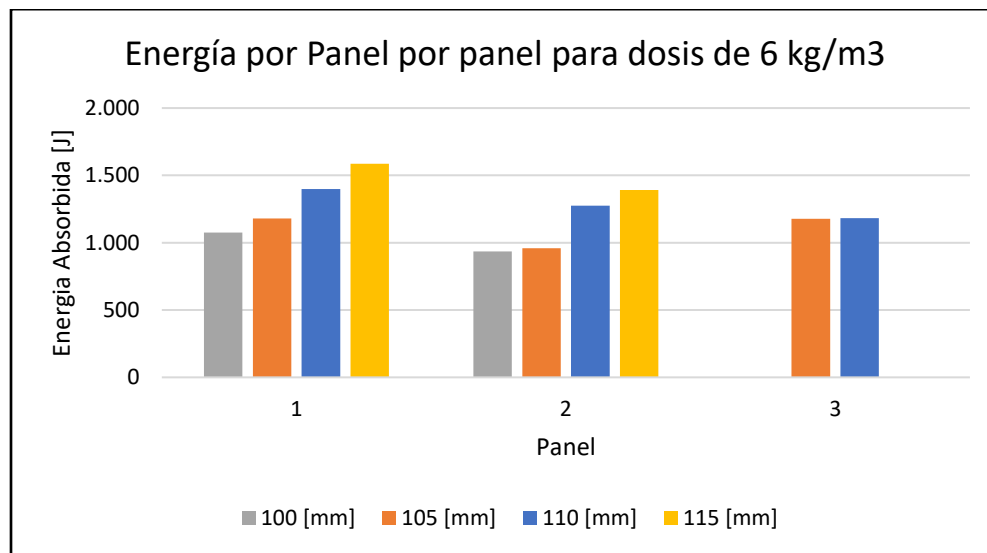


Gráfico 23: Energía absorbida por paneles de 6 kg/m³ de fibra

En el grafico a continuación, se presenta el promedio de la energía absorbida de cada grupo de paneles analizados, con el porcentaje que aumente la energía máxima absorbida respecto

a los paneles de espesor 100 mm. Logrando obtener un factor de aumento de energía absorbida del 48% para los paneles de 115 mm.

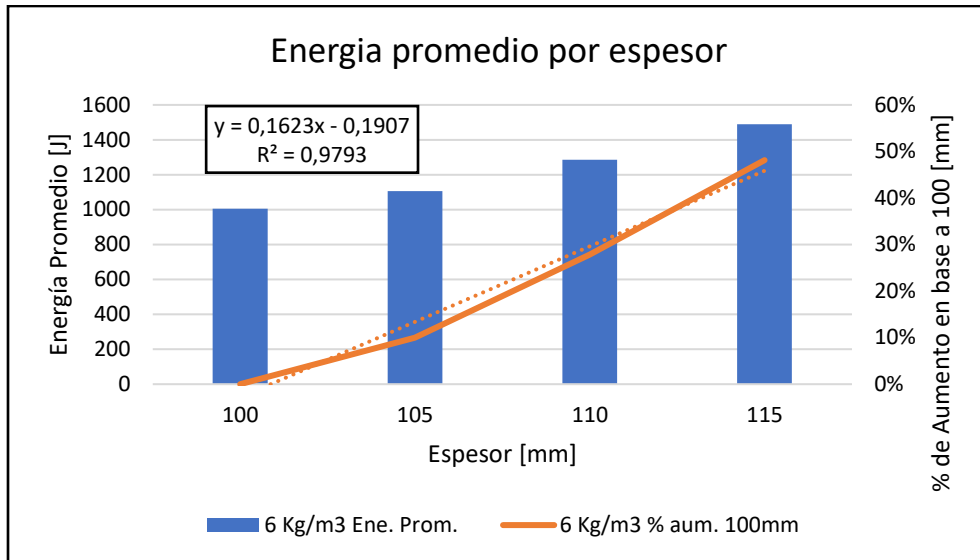


Gráfico 24: Energía promedio y porcentaje de aumento por panel con dosis de 6 kg/m³

Los datos obtenidos presentados en la tabla 17, nos permiten determinar la ecuación de energía absorbida con relación a la altura de los paneles.

Tabla 17: Resumen de resultados experimentales para dosis de 6 kg/m³ de fibra

ESPESOR	100 mm			105mm			110mm			115mm		
Panel	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Carga Max [kN]	55	48		62	48	66	81	73	63	86	97	74,2
Energía [J]	1075	935		1180	958	1178	1400	1275	1181	1586	0	1391,3
Promedio [J]	1005			1105			1286			1489		
CV	10%			12%			9%			9%		
Factor Aumento	0%			10%			28%			48%		

1. Cálculo de medias

$$\bar{U} = \frac{100 + 105 + 110 + 115}{4} = 107,5$$

$$\bar{Y} = \frac{1005 + 1105 + 1286 + 1489}{4} = 1171,25$$

2. Cálculo de pendiente

$$m = \frac{\sum(U_i - \bar{U}) * (Y_i - \bar{Y})}{\sum(U_i - \bar{U})^2}$$

$$m = \frac{4082,5}{125} = 32,66$$

3. Cálculo de Intersección de recta:

$$b = \bar{Y} - m * \bar{U}$$

$$b = 1171,25 - 32,66 * 107,5 = -2331,3$$

4. Ecuación de Recta:

$$Y(h) = 32,66 * h - 2331,3 [J] \quad (2)$$

Donde:

h: El espesor de los paneles en mm

Y: La energía absorbida por los paneles de espesor H en Joule

Por medio de este análisis, se obtiene que la regresión lineal para la ecuación es del 0,98. Lo que sugiere una excelente correlación entre el espesor y la energía absorbida donde los valores se encuentran asociados para esta dosificación de fibras sintéticas. Aunque cabe mencionar que para este análisis se empleó un total de 10 paneles, descartando un panel para los espesores de 100 mm y 115 mm.

Al aplicar la ecuación (2), se obtiene un máximo de diferencia entre la teoría y lo experimental de un 7,0%. No obstante, este margen solo se obtiene en el espesor de 100 mm, en los demás espesores la diferencia no supera el 5%. Se especifica en la tabla 18

Tabla 18: Resumen de resultados experimentales y teórico para dosis 6 kg/m³ de fibra

Panel	Resultados Experimental		Resultado Teórico	
Espeor	Joules	C.V	Joules	Diferencia
100	1005	10%	935	7,0%
105	1105	12%	1098	0,7%
110	1286	9%	1261	1,9%
115	1489	9%	1425	4,3%

Se plantean los factores para normalizar los valores de la capacidad de absorción de energía para paneles de distinto espesor, con el ensayo de panel según la norma EN 14488-5 para asegura un correcto diseño y desempeño de HRF (ver tabla 19)

Tabla 19: Factores para normalizar la capacidad de absorción de los paneles

Factores de capacidad de energía		
Espesor Panel [mm]	Dosis de Fibra	
	4 kg/m ³	6 kg/m ³
100	1	1
105	1,03	1,10
110	1,32	1,28
115	1,31	1,48

Los factores de capacidad de energía presentados en la tabla permiten ajustar los resultados de absorción de energía obtenidos para un espesor base de panel (100 mm), a otros espesores de interés (105, 110 y 115 mm). Estos factores se definen empíricamente para cada combinación de espesor y dosis de fibra, representando la relación proporcional del desempeño mecánico respecto al espesor de referencia.

Para determinar la energía absorbida de un panel con espesor diferente a 100 mm, se aplica el factor de corrección correspondiente, según la siguiente lógica:

Si se conoce la energía absorbida para un panel de 100 mm, se multiplica por el factor del espesor deseado:

$$E_x = E_{100} * F_x$$

Donde:

E_x : energía absorbida estimada para espesor x mm.

E_{100} :: energía absorbida medida o estimada para espesor de 100 mm.

F_x : factor de capacidad de energía correspondiente al espesor x.

Si se posee la energía absorbida de un panel con espesor distinto a 100 mm y se desea normalizar al espesor base (100 mm), se divide por el factor correspondiente:

$$E_{100} = \frac{E_x}{F_x}$$

Esta metodología permite estandarizar los resultados de ensayos de absorción de energía realizados en paneles de distintos espesores, facilitando la comparación directa entre ellos o su uso en cálculos de diseño estructural.

6.3. Ecuación de relación entre espesor y energía absorbida:

Para dosis de 4 kg/m³:

$$Y(h) = 20,86 * h - 1241,7 J \quad (1)$$

Para dosis de 6 kg/m³:

$$Y(h) = 32,66 * h - 2331,3 J \quad (2)$$

Con ambas ecuaciones (1)(2), se propone plantear una nueva ecuación respecto a la variación de dosis de fibra sintética, convirtiéndose en una ecuación de doble variable para obtener la energía de absorción, la dosis de fibra y el espesor. Se realiza el siguiente procedimiento:

1. Coeficiente de h:

$$m(p) = \frac{32,66 - 20,86}{6 - 4} = \frac{11,8}{2} = 5,9$$

$$m(p) = 5,9p + c$$

Usando p = 4, m(4)= 20,86

$$20,86 = 5,9(4) + c \rightarrow c = 20,86 - 23,6 = -2,74$$

Entonces:

$$m(p) = 5,9p - 2,74$$

2. Término independiente:

$$b(p) = \frac{-2331,3 - (-1241,7)}{6 - 4} = \frac{-1089,6}{2} = -544,8$$

$$b(p) = -544,8p + d$$

Usando $p = 4$, $b(p) = -1241,7$

$$-1241,7 = -544,8(4) + d \rightarrow d = 1241,7 + 2179,2 = 937,5$$

Entonces:

$$b(p) = -544,8p + 937,5$$

Por lo tanto, la ecuación generalizada para la absorción de energía en función del espesor (h) y la dosis de fibra (p) es:

$$Y(h, p) = (5,9p - 2,74)h + (-544,8p + 937,5) \quad (3)$$

Donde:

h: El espesor de los paneles en mm.

p: Dosificación de fibras en kg/m^3

Y: La energía absorbida por los paneles de espesor H en Joule

A continuación, se muestran las tablas de comparación entre las dosis de fibra, comparando los resultados de los datos experimentales y empleando la ecuación propuesta (3) para la relación de espesores. Se muestran los resultados en la tabla 18 y tabla 19 respectivamente.

Tabla 20: Comparación de resultados de energía absorbida entre dosis de fibra

Panel	Resultados Experimentales		Diferencia		
	Espeor	4 kg/m^3	6 kg/m^3	Joule	%
100		859	1005	146	17,0%
105		886	1105	219	24,7%
110		1134	1286	152	13,4%
115		1124	1489	365	32,4%

Tabla 21: Comparación de ecuación de energía absorbida entre dosis de fibra

Panel	Resultado Teórico		Diferencia		
	Espeor	4 kg/m^3	6 kg/m^3	Joule	%
100		844	935	91	10,8%
105		949	1098	149	15,7%
110		1053	1261	208	19,7%
115		1157	1425	268	23,1%

En los siguientes gráficos, se presenta la diferencia de energía absorbida que hay entre paneles con el mismo espesor, pero con dosis de fibra diferente, comparando los resultados

de los datos experimentales y aplicando la ecuación teórica (3), para obtener la energía de absorción respecto al espesor de los paneles. Se especifica en el grafico 24 y grafico 25 respectivamente.

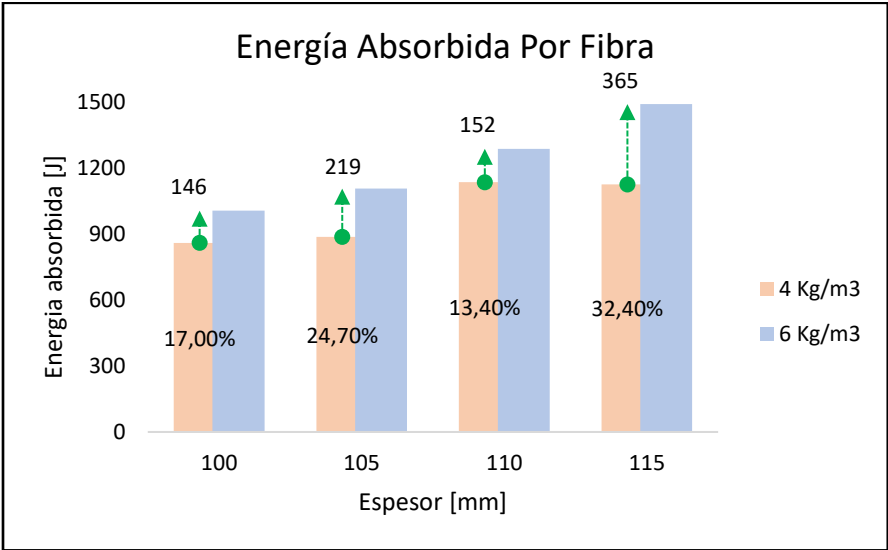


Gráfico 25: Diferencia de resultados de energía absorbida entre dosis de fibra

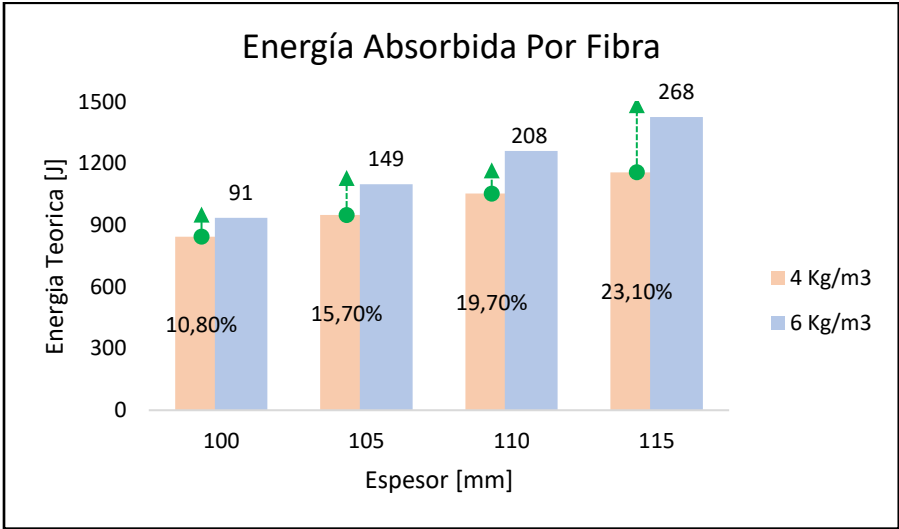


Gráfico 25: Diferencia de energía absorbida entre dosis de fibra implementando ecuación

Los resultados presentaron un incremento de absorción de energía para una mayor dosis de fibra, logrando una capacidad de absorción sobre un 10% de energía para un mismo espesor y a medida que el espesor aumenta, también incrementa la diferencia de capacidad de absorción de energía para espesores con diferente dosis de fibra.

7. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En esta investigación se abordó el análisis de la absorción de energía de paneles de hormigón reforzado con fibras sintéticas de diferentes espesores, siguiendo la metodología establecida por la norma europea EN 14488-5. Esta investigación tiene como objetivo establecer una relación precisa entre el espesor del panel y su capacidad para absorber energía, un factor crucial en el diseño de estructuras subterráneas, como túneles y cavidades, que deben resistir cargas dinámicas e impactos.

Los resultados obtenidos mostraron que la absorción de energía aumenta de forma significativa al incrementar el espesor de los paneles. Para la dosificación de fibra sintética de 4 kg/m^3 , el coeficiente de variación de los datos alcanzó un máximo del 24%, correspondiente a los paneles de 110 mm de espesor, lo que sugiere una mayor dispersión en los resultados para esta dosificación. Sin embargo, esta variabilidad se mantuvo dentro de los márgenes aceptables para estudios experimentales, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,822. Por otro lado, para la dosificación de 6 kg/m^3 , el coeficiente de variación fue más bajo, alcanzando un máximo del 12% para los paneles de 105 mm, y el coeficiente de determinación alcanzó un valor alto de 0,979, lo que refleja una correlación sólida entre el espesor y la absorción de energía en este caso.

Se observó que, al aumentar el espesor de los paneles, la energía absorbida también se incrementa, alcanzando hasta un 48% más de energía absorbida en los paneles de 115 mm respecto a los de 100 mm para una dosificación de 6 kg/m^3 . Mientras que para la dosificación de 4 kg/m^3 se logra un 32% más de energía absorbida para paneles de 110 mm. Este aumento se debe a la mayor capacidad de los paneles más gruesos para resistir la deformación antes de alcanzar el fallo, lo que refleja una mejora en su ductilidad y tenacidad. La relación entre espesor y absorción de energía fue casi lineal para ambas dosificaciones de fibra, lo que sugiere que el modelo propuesto podría generalizarse a otros espesores y aplicaciones.

Además, se descubrió que la mayor dosificación de fibra (6 kg/m^3) proporcionó una absorción de energía superior en comparación con la dosificación de 4 kg/m^3 para un mismo espesor. Este hallazgo resalta la importancia de elegir la cantidad adecuada de fibra sintética, ya que una mayor cantidad de fibra contribuye a una mayor resistencia post-fisuración y capacidad de absorción de energía, lo que es fundamental en contextos donde se esperan cargas dinámicas o impactos, como ocurre en la construcción de túneles y otras obras subterráneas.

Durante el proceso de fabricación y ensayo, se identificaron varios factores que podrían afectar la precisión de los resultados obtenidos. Uno de estos factores fue el proceso de vibrado, en el que se observó un efecto de segregación de las fibras, lo que podría haber generado una distribución no uniforme de las mismas en los paneles, afectando así la capacidad de absorción de energía en algunas áreas. Además, la respuesta de la máquina de ensayo en algunos casos provocó que la carga máxima se alcanzara demasiado rápido, lo que resultó en una falla prematura de las fibras por corte, en lugar de por tracción, lo que podría haber distorsionado los resultados.

A pesar de estas variaciones, los resultados experimentales fueron satisfactorios y proporcionaron una base sólida para establecer un modelo matemático que relaciona la absorción de energía con el espesor de los paneles de hormigón reforzado con fibra sintética.

Este modelo permitirá mejorar la predicción del comportamiento de estos materiales bajo cargas dinámicas, lo que puede tener aplicaciones directas en el diseño de estructuras subterráneas y en la optimización de la dosificación de fibras en hormigones proyectados.

Sin embargo, es importante destacar que, para obtener un modelo aún más robusto y generalizable, se recomienda realizar estudios adicionales que incluyan paneles con distintas dosis de fibra y espesores más allá de los analizados en esta investigación. Esto permitirá refinar la ecuación de absorción de energía y generar un marco de referencia más completo para la industria de la construcción. Además, futuras investigaciones podrían explorar el comportamiento de otros tipos de fibras y su interacción con el hormigón en diferentes condiciones ambientales y de carga.

8. CONCLUSIONES

Esta investigación permitió establecer una relación clara entre el espesor de los paneles de hormigón reforzado con fibras sintéticas y su capacidad de absorción de energía, mediante ensayos realizados conforme a la norma EN 14488-5.

Se logro plantear los factores en base al espesor, que permite estandarizar y normalizar los valores de la capacidad de absorción de energía a través del ensayo de panel cuadrado, para un correcto diseño del hormigón reforzado con fibras.

Los datos demostraron que, al aumentar el espesor del panel, la capacidad de absorción energética también crece significativamente. Para la dosificación de 4 kg/m³ se obtuvo un aumento de hasta 32% en la energía absorbida, mientras que con 6 kg/m³ este incremento llegó hasta un 48%. Además, se propusieron expresiones matemáticas con buenos coeficientes de ajuste ($R^2 = 0,82$ y $R^2 = 0,98$, respectivamente), que permiten normalizar los resultados en función del espesor.

También se identificó que una mayor dosificación de fibra mejora el comportamiento post-fisuración del hormigón, aumentando su tenacidad. La ecuación final desarrollada incorpora espesor y dosificación como variables, proporcionando una herramienta útil para diseñar con mayor precisión este tipo de materiales.

A pesar de ciertas limitaciones durante el ensayo (como segregación de fibras o límites de la maquinaria), los resultados obtenidos son consistentes y de valor técnico. Se recomienda realizar futuras investigaciones que incluyan otros tipos de fibras, rangos mayores de espesor y condiciones ambientales diversas, para robustecer aún más el modelo propuesto.

9. REFERENCIAS

1. ACI Committee 544. (2022). *Guide for the design of fiber-reinforced concrete (ACI 544)*. American Concrete Institute.
2. Aguirre, H., Martínez, C., Pehovaz, H., & Raymundo, C. (2018). *Modelo comparativo de las propiedades físico-mecánicas del shotcrete con contenido de fibras de acero y polipropileno empleado en el sostenimiento de labores mineras subterráneas del Perú*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas.
3. Aire, C. (2018). *Ensayos de control de calidad de hormigón reforzado con fibras en túneles: Experiencia mexicana*. Universidad Autónoma de México.
4. American Concrete Institute. (1989). *ACI 544.2R-89: Measurement of properties of fiber reinforced concrete*. ACI Committee 544.
5. American Concrete Institute. (2016). *ACI 506R-16: Guide to Shotcrete*. ACI Committee 506
6. ASTM International. (2020). *ASTM D7508/D7508M-20: Standard specification for polyolefin chopped strands for use in concrete*. ASTM International.
7. ASTM International. (2023). *ASTM C1116/C1116M-23: Standard specification for fiber-reinforced concrete*. ASTM International.
8. Banthia, N., & Trottier, J. F. (1995). Test methods for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete: Some concerns and a proposition. *ACI Materials Journal*, 92(1), 48–57.
9. Carmona, S., & Molins, C. (2018). *Determinación de la absorción de energía del hormigón reforzado con fibras mediante el ensayo de panel EFNARC y el ensayo Barcelona*. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
10. CEN. (2006). *Norma Europea EN 14488-5: Ensayo de hormigón proyectado. Parte 5: Determinación de la capacidad de absorción de energía de probetas de losa reforzadas con fibra*.
11. EFNARC. (1996). *European specification for sprayed concrete*. <http://www.efnarc.org>
12. Oda, R. (2019). *Comportamiento estructural de los paneles de hormigón reforzados con fibra sintética* [Memoria de título, Universidad Técnica Federico Santa María].
13. Sika. (2014). *Concreto reforzado con fibras*.
14. Zollo, R. F. (1997). Fibre-reinforced concrete: An overview after 30 years of development. *Cement and Concrete Composites*, 19(2), 107–122. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(96\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(96)00046-5)

10. ANEXOS:

Anexo A. Datos de paneles con dosificación de 4 kg/m³ de fibra:

Espesor 100mm						
Deflexión	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Σ Energía	Σ Energía	Σ Energía	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0%
1	12,6	7,4	27,0	15,69	10,13	65%
2	36,9	27,3	39,8	34,67	6,54	19%
3	52,4	31,2	54,3	45,97	12,79	28%
4	41,7	33,9	50,4	42,00	8,28	20%
5	41,9	38,4	51,7	43,98	6,87	16%
6	43,9	42,4	55,2	47,19	7,01	15%
7	44,7	40,8	49,0	44,83	4,06	9%
8	44,0	39,3	50,5	44,60	5,61	13%
9	42,5	37,3	50,7	43,49	6,76	16%
10	41,6	35,4	50,5	42,49	7,60	18%
11	39,8	33,5	49,8	41,05	8,23	20%
12	38,1	32,0	48,4	39,51	8,29	21%
13	37,1	30,3	46,8	38,05	8,29	22%
14	35,9	29,4	45,3	36,87	7,97	22%
15	34,5	28,3	42,3	35,05	7,04	20%
16	33,1	26,8	40,4	33,45	6,82	20%
17	31,4	25,3	37,9	31,53	6,27	20%
18	30,3	24,6	36,7	30,57	6,05	20%
19	29,7	23,6	35,2	29,47	5,80	20%
20	28,5	22,6	34,8	28,60	6,12	21%
21	27,3	21,6	34,4	27,76	6,40	23%
22	25,4	20,3	33,0	26,24	6,37	24%
23	24,8	19,5	31,8	25,34	6,17	24%
24	24,0	18,3	31,1	24,47	6,38	26%
25	23,7	17,6	28,9	23,40	5,67	24%

Espesor 100mm						
Deflexión	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Σ Energía	Σ Energía	Σ Energía	Promedio	Dest. Estan	CV
0,0	0	0	0	0,00	0	0%
1,0	5,6527	3,3659	12,7893	7,27	4,92	68%
2,0	28,1353	19,4595	49,6225	32,41	15,53	48%
3,0	68,2985	51,6385	90,7658	70,23	19,64	28%
4,0	110,9744	84,4615	130,6395	108,69	23,17	21%
5,0	162,6477	119,7591	193,4494	158,62	37,01	23%
6,0	205,4405	160,5986	247,4130	204,48	43,42	21%
7,0	249,8555	202,4370	293,4290	248,57	45,51	18%
8,0	294,4511	242,5688	341,3237	292,78	49,40	17%
9,0	337,6630	280,6286	390,4003	336,23	54,90	16%
10,0	379,7114	316,8734	441,6239	379,40	62,38	16%
11,0	420,5097	351,2971	490,0751	420,63	69,39	16%
12,0	459,5093	384,1307	548,3849	464,01	82,22	18%
13,0	497,1000	415,2710	595,3025	502,56	90,14	18%
14,0	533,4842	445,0195	628,1535	535,55	91,58	17%
15,0	568,6133	473,8029	683,0018	575,14	104,75	18%
16,0	602,4446	501,3140	717,1002	606,95	107,96	18%
17,0	634,6335	527,4017	758,9328	640,32	115,87	18%
18,0	665,4831	552,3326	800,7997	672,87	124,40	18%
19,0	695,4960	576,3900	828,6842	700,19	126,21	18%
20,0	724,6466	599,5028	871,3130	731,82	136,05	19%
21,0	752,4864	621,5917	899,1280	757,74	138,84	18%
22,0	778,7261	642,4746	935,6486	785,62	146,71	19%
23,0	803,9462	662,5010	973,1171	813,19	155,51	19%
24,0	828,3437	681,4195	997,6530	835,81	158,25	19%
25,0	852,3634	699,4250	1025,2163	859,00	163,00	19%

Espesor 105 mm						
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Carga kN	Carga kN	Carga kN	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0%
1	7,99	15,08	8,812	10,63	3,88	36%
2	20,455	42,353	24,293	29,03	11,69	40%
3	32,357	52,338	29,272	37,99	12,52	33%
4	31,085	48,622	44,057	41,25	9,10	22%
5	30,271	52,2	55,583	46,02	13,74	30%
6	47,373	51,22	53,391	50,66	3,05	6%
7	48,809	48,969	49,511	49,10	0,37	1%
8	44,108	46,85	51,334	47,43	3,65	8%
9	44,324	44,238	50,788	46,45	3,76	8%
10	42,767	42,246	50,166	45,06	4,43	10%
11	41,027	40,369	49,66	43,69	5,18	12%
12	39,245	38,772	48,794	42,27	5,65	13%
13	36,852	37,028	47,769	40,55	6,25	15%
14	35,779	35,564	46,829	39,39	6,44	16%
15	34,08	34,104	44,961	37,72	6,28	17%
16	32,895	33,031	43,65	36,53	6,17	17%
17	31,746	31,532	41,92	35,07	5,94	17%
18	30,655	29,688	40,04	33,46	5,72	17%
19	29,888	28,131	38,329	32,12	5,45	17%
20	29,036	26,79	36,102	30,64	4,86	16%
21	27,245	25,309	34,685	29,08	4,95	17%
22	26,251	23,873	33,17	27,76	4,83	17%
23	25,302	22,296	32,875	26,82	5,45	20%
24	24,26	21,081	31,311	25,55	5,24	20%
25	22,998	20,207	30,004	24,40	5,05	21%

Espesor 105mm						
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Σ Energía	Σ Energía	Σ Energía	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
1	4,4	7,3	4,1	5,3	1,7	33%
2	17,8	34,1	20,0	24,0	8,9	37%
3	46,2	76,2	49,9	57,4	16,3	28%
4	77,6	127,2	82,8	95,9	27,3	28%
5	109,8	177,9	134,8	140,9	34,4	24%
6	147,0	230,1	188,7	188,6	41,6	22%
7	180,3	280,2	235,4	232,0	50,1	22%
8	229,8	328,2	286,9	281,6	49,4	18%
9	277,0	373,8	339,5	330,1	49,1	15%
10	321,0	417,0	387,6	375,2	49,2	13%
11	365,1	458,3	441,2	421,5	49,6	12%
12	394,4	497,8	486,4	459,5	56,7	12%
13	442,2	535,7	537,3	505,1	54,5	11%
14	465,6	572,0	581,3	539,6	64,3	12%
15	510,7	607,0	629,0	582,2	62,9	11%
16	549,3	640,5	661,6	617,1	59,7	10%
17	574,6	672,7	712,2	653,2	70,8	11%
18	611,4	703,3	754,7	689,8	72,6	11%
19	635,4	732,1	786,4	718,0	76,5	11%
20	660,5	759,5	825,8	748,6	83,2	11%
21	697,9	785,6	854,9	779,5	78,7	10%
22	719,0	810,3	896,5	808,6	88,8	11%
23	749,9	833,1	930,4	837,8	90,3	11%
24	770,5	854,8	967,4	864,2	98,8	11%
25	792,2	875,5	991,0	886,2	99,8	11%

Espesor 110 mm						
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Carga kN	Carga kN	Carga kN	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0%
1	19,158	32,015	13,428	21,53	9,52	44%
2	59,501	71,815	38,304	56,54	16,95	30%
3	60,839	64,655	35,169	53,55	16,04	30%
4	63,805	73,107	41,272	59,39	16,37	28%
5	65,174	77,69	35,776	59,55	21,52	36%
6	69,963	75,083	40,338	61,79	18,76	30%
7	67,376	73,629	43,127	61,38	16,11	26%
8	63,516	71,437	42,722	59,23	14,83	25%
9	61,587	70,269	41,71	57,86	14,64	25%
10	60,198	67,702	40,661	56,19	13,96	25%
11	57,86	64,657	39,484	54,00	13,02	24%
12	54,799	62,201	38,16	51,72	12,31	24%
13	52,97	59,274	36,96	49,73	11,50	23%
14	50,942	56,168	35,716	47,61	10,63	22%
15	48,685	52,655	34,781	45,37	9,39	21%
16	45,65	51,097	33,731	43,49	8,88	20%
17	42,733	46,761	32,826	40,77	7,17	18%
18	40,537	44,821	31,617	38,99	6,74	17%
19	39,449	43,078	30,967	37,83	6,22	16%
20	38,52	41,187	29,401	36,37	6,18	17%
21	37,813	38,802	28,48	35,03	5,70	16%
22	36,876	36,914	26,485	33,43	6,01	18%
23	36,06	36,066	25,814	32,65	5,92	18%
24	34,808	34,555	24,982	31,45	5,60	18%
25	33,67	33,37	23,472	30,17	5,80	19%

Espesor 110mm						
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Σ Energía	Σ Energía	Σ Energía	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
1	7,5	12,1	6,9	8,8	2,9	32%
2	47,9	67,2	28,9	48,0	19,2	40%
3	101,3	134,3	64,4	100,0	35,0	35%
4	159,2	209,5	107,1	158,6	51,2	32%
5	230,5	285,5	137,2	217,8	75,0	34%
6	298,3	361,6	171,5	277,1	96,8	35%
7	367,7	435,5	225,7	342,9	107,1	31%
8	433,3	496,8	268,7	399,6	117,7	29%
9	495,9	566,9	310,9	457,9	132,2	29%
10	556,6	640,7	352,3	516,5	148,3	29%
11	615,8	711,7	392,5	573,3	163,8	29%
12	671,9	766,7	431,0	623,2	173,1	28%
13	725,8	833,6	468,1	675,8	187,8	28%
14	778,0	893,0	504,3	725,1	199,6	28%
15	827,8	944,4	539,3	770,5	208,6	27%
16	875,2	986,4	574,0	811,9	213,4	26%
17	919,6	1046,9	606,8	857,8	226,5	26%
18	960,7	1089,3	638,0	896,0	232,5	26%
19	1000,8	1129,8	658,5	929,7	243,5	26%
20	1039,4	1177,3	695,8	970,8	247,9	26%
21	1077,8	1219,9	715,8	1004,5	259,9	26%
22	1113,7	1248,2	755,1	1039,0	254,9	25%
23	1147,7	1287,5	777,8	1071,0	263,4	25%
24	1186,8	1329,2	802,5	1106,2	272,4	25%
25	1215,4	1361,8	825,3	1134,2	277,3	24%

Espesor 115 mm						
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Carga kN	Carga kN	Carga kN	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0%
1	15,301	17,879	12,493	15,22	2,69	18%
2	50,669	58,768	39,057	49,50	9,91	20%
3	41,97	65,092	44,686	50,58	12,64	25%
4	38,171	53,683	83,667	58,51	23,13	40%
5	51,196	57,514	62,467	57,06	5,65	10%
6	66,503	50,611	69,509	62,21	10,15	16%
7	64,278	49,798	68,341	60,81	9,75	16%
8	66,62	49,548	66,612	60,93	9,85	16%
9	66,267	48,615	63,816	59,57	9,56	16%
10	65,178	47,749	60,049	57,66	8,96	16%
11	63,56	46,244	57,707	55,84	8,81	16%
12	61,918	45,46	54,622	54,00	8,25	15%
13	58,832	44,905	51,821	51,85	6,96	13%
14	54,049	43,552	49,282	48,96	5,26	11%
15	51,429	41,427	46,087	46,31	5,00	11%
16	50,369	40,096	42,808	44,42	5,32	12%
17	48,574	38,767	40,468	42,60	5,24	12%
18	46,333	37,614	37,823	40,59	4,97	12%
19	45,222	36,277	36,378	39,29	5,14	13%
20	44,428	35,463	34,148	38,01	5,59	15%
21	42,638	34,28	31,785	36,23	5,68	16%
22	40,736	33,871	30,626	35,08	5,16	15%
23	39,601	31,854	28,816	33,42	5,56	17%
24	35,058	30,482	26,411	30,65	4,33	14%
25	31,094	29,239	25,514	28,62	2,84	10%

Espesor 115mm						
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Σ Energía	Σ Energía	Σ Energía	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
1	5,6	7,9	6,3	6,6	1,2	18%
2	32,3	42,9	29,6	34,9	7,0	20%
3	80,0	96,8	74,1	83,6	11,8	14%
4	121,8	155,3	133,6	136,9	17,0	12%
5	164,6	213,8	194,7	191,0	24,8	13%
6	225,0	267,2	258,8	250,3	22,4	9%
7	292,7	301,6	343,0	312,4	26,8	9%
8	354,8	359,0	392,9	368,9	20,9	6%
9	422,0	401,4	463,1	428,8	31,4	7%
10	484,7	460,9	531,8	492,5	36,1	7%
11	548,9	509,1	576,3	544,8	33,8	6%
12	607,9	549,6	639,7	599,1	45,7	8%
13	662,5	591,7	699,7	651,3	54,9	8%
14	729,4	638,6	740,9	703,0	56,0	8%
15	784,0	680,3	793,1	752,5	62,7	8%
16	829,4	717,6	845,0	797,3	69,5	9%
17	878,5	760,4	878,2	839,0	68,0	8%
18	931,1	797,9	924,8	884,6	75,1	8%
19	976,4	832,8	956,6	921,9	77,8	8%
20	1016,1	872,8	991,5	960,2	76,6	8%
21	1053,9	908,5	1028,8	997,1	77,7	8%
22	1097,0	940,7	1050,2	1029,3	80,2	8%
23	1134,4	978,1	1079,2	1063,9	79,3	7%
24	1173,0	1010,1	1115,5	1099,5	82,6	8%
25	1210,1	1031,2	1132,0	1124,4	89,7	8%

Anexo B. Datos de paneles con dosificación de 6 kg/m³ de fibra:

Espesor 100mm					
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Estadística		
	Carga kN	Carga kN	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,00	0,00	0%
1	11,8	21,6	16,7	7,0	42%
2	42,2	35,2	38,7	4,9	13%
3	50,4	41,3	45,9	6,4	14%
4	53,4	43,0	48,2	7,4	15%
5	49,3	46,0	47,6	2,4	5%
6	50,9	47,0	48,9	2,7	6%
7	52,8	47,5	50,2	3,8	8%
8	53,9	46,9	50,4	5,0	10%
9	53,8	45,7	49,8	5,8	12%
10	52,7	45,0	48,9	5,4	11%
11	51,7	43,3	47,5	5,9	12%
12	50,8	41,8	46,3	6,3	14%
13	48,7	40,2	44,5	6,0	13%
14	47,5	39,1	43,3	5,9	14%
15	46,5	37,5	42,0	6,3	15%
16	45,5	36,9	41,2	6,1	15%
17	43,9	35,7	39,8	5,7	14%
18	42,9	34,4	38,7	6,0	15%
19	40,4	33,5	37,0	4,8	13%
20	38,9	32,4	35,6	4,6	13%
21	38,0	31,2	34,6	4,7	14%
22	35,9	30,3	33,1	3,9	12%
23	34,6	29,7	32,1	3,5	11%
24	34,1	29,0	31,5	3,6	11%
25	32,4	27,8	30,1	3,2	11%

Espesor 100mm					
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Estadística		
	Σ Energía	Σ Energía	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0	0	0,00	0	0%
1	5,9	9,6	7,7	2,6	34%
2	28,2	43,5	35,9	10,8	30%
3	71,7	84,4	78,0	9,0	12%
4	120,2	126,0	123,1	4,1	3%
5	170,6	170,8	170,7	0,1	0%
6	220,6	217,4	219,0	2,3	1%
7	272,7	264,5	268,6	5,8	2%
8	326,0	311,7	318,9	10,1	3%
9	380,0	358,1	369,1	15,5	4%
10	433,4	403,4	418,4	21,2	5%
11	485,3	447,8	466,6	26,5	6%
12	536,6	490,4	513,5	32,7	6%
13	586,8	531,4	559,1	39,2	7%
14	634,9	571,2	603,0	45,0	7%
15	681,7	609,5	645,6	51,0	8%
16	727,8	646,4	687,1	57,6	8%
17	772,4	682,8	727,6	63,4	9%
18	815,9	718,1	767,0	69,2	9%
19	857,8	752,1	804,9	74,7	9%
20	897,0	785,1	841,1	79,2	9%
21	935,5	816,8	876,1	83,9	10%
22	972,5	847,4	910,0	88,5	10%
23	1007,7	877,5	942,6	92,1	10%
24	1041,9	906,8	974,4	95,5	10%
25	1075,2	935,1	1005,1	99,1	10%

Espesor 105 mm						
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Carga kN	Carga kN	Carga kN	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0%
1	14,7	23,3	33,3	23,8	9,4	39%
2	38,2	32,7	49,5	40,1	8,6	21%
3	54,2	39,9	60,4	51,5	10,5	20%
4	56,7	34,4	60,6	50,6	14,1	28%
5	59,4	38,3	61,7	53,1	12,9	24%
6	58,6	46,6	62,3	55,8	8,2	15%
7	58,8	45,2	61,7	55,2	8,8	16%
8	60,7	46,9	60,6	56,1	8,0	14%
9	61,3	47,7	58,8	56,0	7,2	13%
10	60,6	48,1	56,6	55,1	6,4	12%
11	59,4	47,3	55,0	53,9	6,1	11%
12	57,9	46,3	53,3	52,5	5,9	11%
13	56,9	45,1	50,9	50,9	5,9	12%
14	54,7	44,4	48,8	49,3	5,1	10%
15	51,0	42,9	46,1	46,7	4,1	9%
16	48,5	41,3	44,6	44,8	3,6	8%
17	45,1	39,9	42,8	42,6	2,7	6%
18	43,5	38,0	41,3	41,0	2,8	7%
19	41,9	36,2	39,6	39,2	2,9	7%
20	40,6	34,6	37,7	37,6	3,0	8%
21	38,5	33,3	35,3	35,7	2,7	7%
22	36,9	31,9	33,6	34,1	2,5	7%
23	35,2	29,9	32,1	32,4	2,7	8%
24	33,5	28,8	30,8	31,0	2,3	8%
25	31,1	27,7	28,7	29,2	1,8	6%

Espesor 105mm						
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Σ Energía	Σ Energía	Σ Energía	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
1	6,4	12,8	13,1	10,8	3,8	35%
2	30,4	40,4	56,3	42,4	13,0	31%
3	77,6	77,9	112,3	89,3	20,0	22%
4	130,4	112,3	179,7	140,8	34,9	25%
5	186,5	152,6	240,0	193,0	44,1	23%
6	249,8	186,8	302,3	246,3	57,8	23%
7	308,1	239,1	364,2	303,8	62,7	21%
8	368,3	285,3	425,6	359,7	70,5	20%
9	429,4	332,7	485,4	415,8	77,3	19%
10	490,5	380,7	543,1	471,5	82,8	18%
11	550,6	428,4	598,9	526,0	87,9	17%
12	609,0	475,4	653,1	579,2	92,5	16%
13	666,4	521,0	705,8	631,1	97,3	15%
14	722,3	565,8	755,2	681,1	101,2	15%
15	774,9	609,7	802,6	729,0	104,3	14%
16	824,6	651,7	848,0	774,8	107,2	14%
17	871,8	692,3	891,6	818,6	109,8	13%
18	916,1	730,8	933,6	860,2	112,4	13%
19	958,8	767,9	974,4	900,4	115,0	13%
20	1000,0	803,4	1013,1	938,8	117,5	13%
21	1039,6	837,3	1049,3	975,4	119,7	12%
22	1077,3	869,8	1083,9	1010,3	121,7	12%
23	1113,4	900,8	1116,7	1043,6	123,7	12%
24	1147,7	930,1	1148,1	1075,3	125,7	12%
25	1180,0	958,4	1178,0	1105,5	127,4	12%

Espesor 110 mm						
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Carga kN	Carga kN	Carga kN	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0%
1	29,0	10,7	24,3	21,3	9,5	44%
2	60,3	41,9	36,8	46,3	12,4	27%
3	73,5	48,6	44,2	55,4	15,8	28%
4	73,7	67,2	50,1	63,7	12,2	19%
5	76,9	65,4	54,5	65,6	11,2	17%
6	76,4	72,1	58,5	69,0	9,3	14%
7	72,5	72,5	61,2	68,7	6,5	9%
8	70,7	70,1	61,5	67,4	5,1	8%
9	69,1	67,0	54,3	63,5	8,0	13%
10	67,2	63,6	60,5	63,8	3,4	5%
11	65,5	60,4	62,9	62,9	2,5	4%
12	62,8	58,6	62,0	61,1	2,3	4%
13	61,0	55,8	59,2	58,7	2,6	5%
14	59,3	55,0	55,5	56,6	2,3	4%
15	56,9	53,5	51,2	53,9	2,9	5%
16	53,6	51,8	49,0	51,5	2,3	5%
17	50,6	50,6	47,4	49,5	1,9	4%
18	48,5	49,1	44,7	47,4	2,4	5%
19	46,2	46,9	42,9	45,3	2,1	5%
20	44,0	45,4	40,7	43,4	2,4	6%
21	41,8	44,0	38,9	41,5	2,6	6%
22	39,2	42,4	36,1	39,3	3,2	8%
23	37,6	38,0	34,7	36,7	1,8	5%
24	35,2	36,1	33,9	35,1	1,1	3%
25	33,9	34,3	31,2	33,1	1,7	5%

Espesor 110mm						
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Σ Energía	Σ Energía	Σ Energía	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
1	12,5	4,6	9,9	9,0	4,0	44%
2	63,6	28,8	47,4	46,6	17,4	37%
3	125,4	71,3	88,3	95,0	27,7	29%
4	210,8	123,0	135,1	156,3	47,6	30%
5	285,9	201,7	188,9	225,5	52,7	23%
6	362,2	270,9	245,3	292,8	61,4	21%
7	437,4	343,7	305,2	362,1	68,0	19%
8	509,1	414,7	367,0	430,3	72,3	17%
9	579,0	483,3	421,8	494,7	79,2	16%
10	647,3	548,6	478,8	558,2	84,6	15%
11	713,4	610,4	542,9	622,2	85,8	14%
12	777,7	669,9	594,4	680,7	92,1	14%
13	839,2	726,6	652,6	739,5	94,0	13%
14	899,5	781,5	722,8	801,3	90,0	11%
15	957,8	835,8	770,1	854,6	95,2	11%
16	1013,1	888,1	816,2	905,8	99,6	11%
17	1065,3	940,3	859,8	955,1	103,6	11%
18	1114,8	985,9	918,6	1006,5	99,7	10%
19	1162,1	1037,1	946,3	1048,5	108,3	10%
20	1207,2	1083,8	999,5	1096,8	104,5	10%
21	1250,2	1120,6	1036,6	1135,8	107,6	9%
22	1290,7	1156,1	1076,9	1174,6	108,1	9%
23	1329,0	1206,9	1108,0	1214,6	110,7	9%
24	1365,5	1239,9	1138,8	1248,1	113,6	9%
25	1399,7	1275,4	1181,4	1285,5	109,5	9%

Espesor 115 mm						
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Carga kN	Carga kN	Carga kN	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,00	0%
1	11,6	39,5	34,9	28,6	15,0	52%
2	45,6	73,1	53,0	57,2	14,2	25%
3	51,2	88,6	62,6	67,5	19,1	28%
4	61,1	96,3	72,5	76,6	18,0	23%
5	66,5	96,8	72,2	78,5	16,1	21%
6	73,9		73,2	73,6	0,5	1%
7	80,0		72,9	76,5	5,1	7%
8	83,7		72,0	77,8	8,3	11%
9	85,9		69,4	77,6	11,7	15%
10	85,6		67,0	76,3	13,1	17%
11	82,1		64,6	73,4	12,4	17%
12	80,4		62,7	71,5	12,5	18%
13	78,3		61,1	69,7	12,2	17%
14	76,7		58,5	67,6	12,9	19%
15	75,5		56,8	66,1	13,2	20%
16	74,3		54,9	64,6	13,7	21%
17	72,8		52,4	62,6	14,4	23%
18	69,2		50,8	60,0	13,0	22%
19	63,1		48,7	55,9	10,2	18%
20	58,0		45,8	51,9	8,6	17%
21	55,3		43,4	49,4	8,4	17%
22	52,2		41,6	46,9	7,6	16%
23	46,9		39,5	43,2	5,2	12%
24	43,6		37,6	40,6	4,2	10%
25	41,7		35,5	38,6	4,4	11%

Espesor 115mm						
Deflexión mm	Panel 1	Panel 2	Panel 3	Estadística		
	Σ Energía	Σ Energía	Σ Energía	Promedio	Dest. Estan	CV
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0%
1	4,9	17,6	14,2	12,2	6,6	54%
2	31,0	80,7	63,2	58,3	25,2	43%
3	74,8	158,0	123,8	118,9	41,8	35%
4	140,0	249,1	191,8	193,6	54,6	28%
5	202,5	254,1	264,3	240,3	33,1	14%
6	277,4		337,6	307,5	42,6	14%
7	354,1		409,9	382,0	39,4	10%
8	436,2		482,5	459,3	32,7	7%
9	520,8		553,2	537,0	23,0	4%
10	607,2		621,4	614,3	10,1	2%
11	690,0		687,0	688,5	2,1	0%
12	771,0		750,6	760,8	14,4	2%
13	851,0		812,8	831,9	27,1	3%
14	927,8		872,8	900,3	38,9	4%
15	1004,0		930,1	967,0	52,3	5%
16	1076,4		986,2	1031,3	63,8	6%
17	1149,0		1039,7	1094,3	77,2	7%
18	1220,1		1091,2	1155,6	91,1	8%
19	1283,0		1140,8	1211,9	100,5	8%
20	1348,6		1188,3	1268,4	113,4	9%
21	1400,5		1232,8	1316,7	118,6	9%
22	1444,0		1275,3	1359,7	119,3	9%
23	1505,0		1316,0	1410,5	133,6	9%
24	1546,0		1354,9	1450,4	135,1	9%
25	1586,4		1391,3	1488,9	137,9	9%