



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSA COMO ADITIVO PARA EL CURADO
INTERNO Y DURABILIDAD DEL HORMIGÓN**

POR

Miguel Ángel Figueroa Muñoz

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Luis Merino

Profesor Comisión
Sebastián Calderón

Enero, 2026
Concepción (Chile)
© 2025 Miguel Ángel Figueroa Muñoz

© 2025 Miguel Ángel Figueroa Muñoz

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi madre, Alicia, por ser mi apoyo más firme y acompañarme con una fortaleza y un amor que han dado sentido a cada paso de este camino. A mi padre, Óscar, que me guía desde el cielo y cuya presencia ha sido una luz constante en mi vida. A mi hermana Andrea y a mi sobrino Alejandro, quienes han aportado cariño, compañía y motivación en cada etapa. A mi novia, Catalina, por su amor incondicional, su paciencia y su apoyo sincero. Y a mis amigos, que nunca me dejaron solo, cuyas risas y consejos fueron un refugio en los días más difíciles. Cada uno de ustedes dejó una huella en este proceso. Este logro es para todos ustedes, porque han sido el pilar que me sostuvo en lo académico y en la vida.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al proyecto FONDEF ID23i10431 por el financiamiento parcial otorgado y por impulsar el desarrollo de iniciativas orientadas a la valorización de residuos para su incorporación en materiales cementicios.

Asimismo, extiendo mi agradecimiento al proyecto VRID Interdisciplina 2022000663INT “Bioeconomía en sector forestal y construcción: valorización de residuos de celulosa para la confección de hormigones sustentables”, cuyo apoyo fue fundamental para la realización de este trabajo.

Agradezco al Laboratorio de Productos Forestales de la Universidad de Concepción por su valiosa colaboración en la fabricación de nanofibras de celulosa y en los análisis asociados al comportamiento hídrico de las muestras.

Agradezco también al Laboratorio de Hormigones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, en particular al laboratorista Sr. Carlos Bustos por su apoyo permanente, y al Sr. Iván Muñoz, Ingeniero de Proyectos, por su orientación, disposición y aporte técnico durante las distintas etapas del desarrollo experimental.

Manifiesto mi sincero agradecimiento a mi profesor guía, Dr. Luis Merino, por su confianza, acompañamiento, gestión y constante apoyo durante todo el proceso investigativo y experimental.

Finalmente, agradezco al profesor comisión Dr. Sebastián Calderón por su tiempo y comentarios de este documento.

RESUMEN

La incorporación de nanofibras de celulosa recicladas provenientes de sacos de cemento surge como una alternativa para mejorar la hidratación interna del hormigón y contribuir a materiales más sostenibles. Estas fibras, con alta capacidad de retención y liberación gradual de agua, permiten sostener el proceso de hidratación del cemento más allá del curado inicial, favoreciendo una microestructura más estable y una matriz menos susceptible a la formación de poros conectados.

El estudio consideró mezclas elaboradas con diferentes proporciones entre fibras de tamaño grande (TG) y pequeño (TP), manteniendo constantes los materiales base y aplicando dosificaciones reducidas del aditivo. Las propiedades de los hormigones se evaluaron mediante ensayos de trabajabilidad, resistencia mecánica, grado de hidratación y absorción capilar, lo que permitió observar con claridad la influencia del aditivo desde edades tempranas hasta etapas avanzadas de curado.

Los resultados mostraron una disminución consistente de la trabajabilidad, asociada a la capacidad de las nanofibras para absorber parte del agua libre. En etapas tempranas, la resistencia mecánica se mantuvo cercana al patrón, mientras que en edades avanzadas se observaron mejoras atribuibles a una hidratación más prolongada. El análisis del grado de hidratación confirmó la presencia de un curado interno efectivo, especialmente en configuraciones equilibradas entre fibras grandes y pequeñas. Asimismo, la absorción capilar evidenció una red porosa más densa y menor permeabilidad en las probetas modificadas.

En conjunto, el uso de nanofibras recicladas demostró aportar beneficios significativos en términos de hidratación, estabilidad microestructural y durabilidad potencial del hormigón, destacándose como un aditivo con proyección para aplicaciones donde se requiera mejorar el desempeño interno del material sin incrementar su impacto ambiental.

ABSTRACT

The incorporation of recycled cellulose nanofibers obtained from post-consumer cement bags emerges as an alternative for enhancing internal hydration in concrete and contributing to more sustainable materials. These fibers, characterized by their high capacity to retain and gradually release water, help sustain the cement hydration process beyond the initial curing stage, promoting a more stable microstructure and a matrix less susceptible to the formation of connected pores.

The study considered mixtures produced with different proportions of large (TG) and small (TP) fibers, keeping the base materials constant and applying reduced dosages of the additive. Concrete properties were evaluated through workability tests, mechanical strength, degree of hydration, and capillary absorption, allowing the influence of the additive to be clearly observed from early ages to advanced curing stages.

The results showed a consistent decrease in workability, associated with the ability of the nanofibers to absorb part of the free water. At early stages, mechanical strength remained close to that of the control mix, while improvements were observed at later ages due to a more prolonged hydration process. The analysis of the degree of hydration confirmed the presence of an effective internal curing mechanism, particularly in balanced configurations between large and small fibers. Likewise, capillary absorption results indicated a denser pore network and lower permeability in the modified specimens.

Overall, the use of recycled nanofibers demonstrated significant benefits in terms of hydration, microstructural stability, and potential durability of concrete, standing out as an additive with strong potential for applications requiring improved internal performance without increasing environmental impact.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcance del estudio	3
1.4. Plan de trabajo	3
1.5. Principales resultados.....	4
1.6. Organización de la memoria de título	4
CAPÍTULO 2: HORMIGÓN CON ADICIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSA	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. Composición y propiedades del hormigón.....	5
2.3. Proceso de hidratación y curado del cemento	7
2.3.1 Hidratación del cemento.....	8
2.3.2 Curado del hormigón.....	8
2.4. Durabilidad del hormigón y mecanismos de deterioro	9
2.5. Nanofibras de celulosa	11
2.5.1 Origen y estructura de la celulosa	11
2.5.2 Nanofibras de celulosa: Obtención y clasificación	12
2.5.3 Propiedades fisicoquímicas relevantes	13
2.5.4 Aplicaciones en materiales cementicios	14
2.6. Nanofibras de celulosa recicladas a partir de sacos de cemento	15
2.6.1 Metodología de obtención de las nanofibras	15
2.6.2 Brecha identificada.....	15
2.7. Conclusiones.....	16

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	18
3.1. Introducción.....	18
3.2. Materiales utilizados	18
3.2.1 Nanofibras de celulosa.....	18
3.3. Diseño de mezclas y plan experimental	19
3.3.1 Mezclas y nomenclatura	20
3.3.2 Dosificación base	20
3.3.3 Cronología de confecciones y ensayos.....	22
3.4. Métodos de ensayo	23
3.4.1 Ensayo de pérdida por ignición (LOI).....	23
3.4.2 Ensayo de absorción capilar.....	25
3.5. Procedimiento experimental.....	29
3.5.1 Preparación de materiales	29
3.5.2 Mezclado de hormigón	29
3.5.3 Moldeo de probetas	30
3.5.4 Curado y almacenamiento	30
3.5.5 Ejecución de los ensayos	30
3.6. Conclusiones.....	31
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	33
4.1. Introducción.....	33
4.2. Resultados áridos	33
4.2.1 Densidad y absorción de los áridos	33
4.2.2 Análisis granulométrico.....	34
4.3. Ensayo de trabajabilidad – Cono de Abrams (NCh1019:2009)	35
4.4. Ensayo de resistencia a la compresión (NCh1037:2009).....	39
4.5. Ensayo de pérdida por ignición	44

4.6. Ensayo de absorción capilar	51
4.7. Conclusiones.....	58
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	59
GLOSARIO	61
REFERENCIAS	63
ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE....	66
ANEXO 2.1: MÉTODO DE OBTENCIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSA RECICLADA Y COMPARACIÓN DE ESTUDIOS PREVIOS	67
2.1.1 Limpieza y recuperación de la fibra.....	67
2.1.2 Producción enzimática – mecánica	67
2.1.3 Caracterización y rol funcional del aditivo	68
2.1.4 Comparación de estudios previos	69
ANEXO 3.1: COMPONENTES DE MEZCLAS CEMENTICIAS	71
3.1.1 Cemento.....	71
3.1.2 Agua	71
3.1.3 Áridos	72
ANEXO 3.2: ENSAYOS DE FLUIDEZ Y RESISTENCIA.....	74
3.2.1 Ensayo de consistencia – Cono de Abrams	74
3.2.2 Ensayo de resistencia a la compresión uniaxial	74
ANEXO 3.3: DOSIFICACIONES	76
ANEXO 4.1: GRANULOMETRÍA	78
ANEXO 4.2: CURVAS DE ABSORCIÓN CAPILAR.....	80
ANEXO 4.3: DATOS OBTENIDOS DE ENSAYO DE TRABAJABILIDAD.....	82
ANEXO 4.4: DATOS OBTENIDOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN UNIAxIAL	84
ANEXO 4.5: DATOS OBTENIDOS ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Dosificación base porcentaje de adición 0.05%	21
Tabla 3.2 Dosificación base porcentaje de adición 0.1%	21
Tabla 3.3 Cronología confecciones	22
Tabla 4.1 Resultados densidad y absorción de áridos utilizados	34
Tabla 4.2 Resultados de sorptividad inicial, sorptividad secundaria y coeficiente de correlación	57
Tabla A.2.1.1 Caracterización de nanofibras de celulosa.....	68
Tabla A.2.1.2 Síntesis comparativa de estudios Universidad de Concepción	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Hidratación de partículas de cemento Portland	6
Figura 2.2 Estructura jerárquica de la celulosa	12
Figura 2.3 Esquema de hidratación del cemento con NFC.....	14
Figura 3.1 Extracción de muestra para ensayo LOI	25
Figura 3.2 Montaje ensayo absorción por capilaridad.....	27
Figura 4.1 Resultados ensayo de trabajabilidad 14/05/2025	35
Figura 4.2 Resultados ensayo de trabajabilidad 16/05/2025	35
Figura 4.3 Resultados ensayo de trabajabilidad, ensayo de larga duración 04/06/2025	36
Figura 4.4 Resultados ensayo de trabajabilidad 17/06/2025, influencia de la proporción 50-50	37
Figura 4.5 Resultados ensayo de trabajabilidad 18/07/2025	37
Figura 4.6 Resultados ensayo de trabajabilidad 30/07/2025	37
Figura 4.7 Resultados resistencia a la compresión, confección 14/05/2025	39
Figura 4.8 Resultados resistencia a la compresión, confección 16/05/2025	39
Figura 4.9 Resistencia a la compresión confección 04/06/2025, impacto en larga duración	40
Figura 4.10 Resistencia a la compresión confección 17/06/2025, impacto de la proporción 50-50..	41
Figura 4.11 Resistencia a la compresión confección 18/07/2025, impacto mezcla M-A5050-0.05.	42
Figura 4.12 Resistencia a la compresión confección 30/07/2025, impacto mezcla M-A5050-0.05..	42
Figura 4.13 DOH confecciones 14/05/2025 y 16/05/2025.....	45
Figura 4.14 Variación porcentual del DoH con respecto al patrón, confecciones 14/05/2025 y 16/05/2025	46
Figura 4.15 DoH confección 04/06/2025 larga duración	47
Figura 4.16 Variación porcentual del DoH con respecto al patrón, confección 04/06/2025 larga duración	47
Figura 4.17 DoH confección 17/06/2025	48
Figura 4.18 Variación porcentual del DoH con respecto al patrón, confección 17/06/2025.....	48
Figura 4.19 DoH confección 18/07/2025 durabilidad 1	49
Figura 4.20 Variación porcentual del DoH con respecto al patrón, confección 18/07/2025 durabilidad 1	49
Figura 4.21 DoH confección 30/07/2025 durabilidad 2	50
Figura 4.22 Variación porcentual del DoH con respecto al patrón, confección 30/07/2025 durabilidad 2.....	50

Figura 4.23 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFCTG50%-TP50% 0,05%, comparación parte inferior y superior	53
Figura 4.24 Comparación absorción capilar con respecto al patrón, parte superior	53
Figura 4.25 Comparación absorción capilar con respecto al patrón, parte inferior	55
Figura 4.26 Comparación absorción capilar con respecto al patrón, parte inferior y superior	56
Figura A.3.0.1.1 Cemento Bio Bio especial, utilizado para todas las confecciones	71
Figura A.3.1.0.2 Árido fino utilizado en confecciones	72
Figura A.3.1.0.3 Árido grueso utilizado en confecciones	73

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La industria de la construcción enfrenta retos cada vez más importantes relacionados con la durabilidad y la sostenibilidad de los materiales utilizados, siendo el hormigón uno de los componentes más críticos. Aunque el hormigón posee excelentes propiedades estructurales, su durabilidad está fuertemente influenciada por un curado adecuado. Durante este proceso, es crucial que el hormigón mantenga una cantidad suficiente de agua para asegurar la correcta hidratación del cemento, lo que, a su vez, garantiza resistencia y durabilidad del material. No obstante, en la práctica, mantener estas condiciones de curado óptimas son un desafío, especialmente en estructuras expuestas a ambientes agresivos, donde el curado externo no siempre es suficiente.

En este contexto, la nanofibra de celulosa reciclada, obtenida de sacos de cemento posconsumo, surge como una innovación sostenible para optimizar el proceso de curado del hormigón. Estas nanofibras poseen la capacidad de retener agua, actuando como agentes de curado interno que liberan agua de manera controlada, y de esta forma, facilitan la hidratación continua del cemento. Esta capacidad de liberar agua de manera gradual es fundamental para evitar la pérdida prematura de humedad y mejorar la microestructura del hormigón, lo que contribuye tanto a la resistencia mecánica como a la durabilidad del material.

Además de los beneficios estructurales, el uso de nanofibras recicladas ofrece una solución sostenible dentro de la construcción, promoviendo la economía circular y la reducción de residuos industriales. Según antecedentes del Banco Central de Chile, el despacho anual de cemento alcanza las 5.195.088 toneladas, de las cuales aproximadamente un 30 % se comercializa en formato ensacado, generando entre 7.500 y 9.400 toneladas anuales de residuos asociados a sacos de cemento posconsumo. En este contexto, la producción de nanofibras de celulosa a partir de estos residuos permite reducir parcialmente este flujo, al valorizar un desecho industrial como aditivo funcional en hormigones y constituir una alternativa más sostenible frente a aditivos convencionales.

El Anexo 1.1 muestra la contribución de la Memoria de Título a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el impacto de la incorporación de nanofibras de celulosa recicladas como aditivo en mezclas de hormigón, con énfasis en el curado interno, resistencia mecánica, durabilidad y la búsqueda de la mezcla óptima entre dos tamaños de nanofibras de celulosa.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Evaluar la resistencia a la compresión uniaxial de las mezclas de hormigón con nanofibras de celulosa reciclada, incluyendo combinaciones de TG (fibra grande) y TP (fibra pequeña), a los 7, 14, y 28 días, así como en ensayos de larga duración a los 56 y 90 días.
2. Evaluar el grado de hidratación del hormigón mediante el ensayo *Loss on Ignition* (LOI), determinando el impacto de las nanofibras de celulosa recicladas en la hidratación interna del cemento.
3. Analizar la durabilidad del hormigón mediante el ensayo de absorción capilar, determinando cómo las mezclas con diferentes proporciones de TG y TP afectan la permeabilidad y resistencia a la penetración del agua.
4. Identificar la mezcla óptima de nanofibras de celulosa, considerando el impacto en el curado interno, resistencia mecánica y la durabilidad, mediante la evaluación comparativa de las mezclas con TG y TP en diferentes proporciones y combinaciones, con adiciones de 0.05% y 0.1% en relación con el peso del cemento.

1.3. Alcance del estudio

El estudio se centrará en evaluar el efecto de nanofibras de celulosa recicladas en el curado interno, la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón. Se emplearán mezclas con proporciones TG-TP de 50%-50%, 80%-20% y 20%-80%, con adiciones de 0,05% y 0,1% en relación con el peso del cemento. Las cuales se someterán a ensayos de trabajabilidad, resistencia a la compresión, absorción capilar y grado de hidratación mediante el ensayo *Loss on Ignition* (LOI).

Las pruebas se desarrollarán en condiciones de laboratorio, utilizando probetas curadas en cámara húmeda, sin considerar la exposición a agentes químicos o variaciones extremas de temperatura. El alcance excluye otros tipos de aditivos distintos a las nanofibras recicladas.

1.4. Plan de trabajo

El trabajo comenzará con una revisión de normas nacionales e internacionales aplicables al cemento, áridos, hormigón y aditivos, garantizando el cumplimiento de estándares de fabricación y ensayo. Posteriormente, se efectuará una revisión del estado del arte sobre el uso de nanofibras de celulosa en hormigones, identificando las morfologías y concentraciones más empleadas.

Con base en esta revisión, se prepararán mezclas patrón sin aditivos y mezclas con nanofibras en combinaciones TG (tamaño grande) - TP (tamaño pequeño) (50%-50%, 80%-20% y 20%-80%) y adiciones de 0,05% y 0,1%. Se realizarán ensayos de cono de Abrams, compresión uniaxial, absorción capilar y LOI para evaluar las propiedades físicas y químicas.

A partir de los resultados, se seleccionarán las combinaciones más prometedoras, reduciendo el número de mezclas para análisis detallado. Finalmente, se compararán las mezclas con aditivo frente a las de referencia, identificando la más eficiente en términos de curado interno, resistencia y durabilidad.

1.5. Principales resultados

Los resultados indicaron que la incorporación de nanofibras de celulosa recicladas mejoró el comportamiento del hormigón en términos de resistencia a la compresión e hidratación, especialmente cuando se utilizaron bajos porcentajes de adición (0,05 %). En comparación con la mezcla patrón, se observaron incrementos de hasta 14,5 % en la resistencia a la compresión y de hasta 26 % en el grado de hidratación, lo que evidencia un efecto positivo asociado al curado interno promovido por las nanofibras. No obstante, las mezclas con adición presentaron una disminución de la trabajabilidad de hasta un 85 %, atribuida a la elevada capacidad de absorción de agua de las fibras.

La mezcla con proporción 50%TG–50%TP y una adición del 0,05% alcanzó la mejor relación entre resistencia y durabilidad. Esta formulación mostró incrementos en la resistencia a la compresión y un mayor grado de hidratación, evidenciando un proceso de curado interno más eficiente.

En conjunto, se estableció que el uso de nanofibras recicladas de sacos de cemento favoreció la formación de una microestructura más densa, lo que contribuyó a la mejora global del desempeño del hormigón.

1.6. Organización de la memoria de título

El documento se organiza en cinco capítulos. El Capítulo 2 aborda los requisitos normativos del hormigón y sus componentes, además de una revisión del estado del arte sobre el uso de nanofibras de celulosa en mezclas cementantes. En este capítulo también se incluirá información detallada de las nanofibras de celulosa, sus propiedades, obtención y su potencial para mejorar las características del hormigón. El Capítulo 3 describe el plan experimental, los materiales utilizados y los ensayos realizados en laboratorio. El capítulo 4 detalla los resultados obtenidos en la experimentación, comparando las mezclas con aditivo frente a las mezclas patrón, mediante un profundo análisis. Finalmente, en el Capítulo 5, se exponen las conclusiones de la investigación, así como las recomendaciones y líneas futuras de investigación.

CAPÍTULO 2: HORMIGÓN CON ADICIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSA

2.1. Introducción

En el presente capítulo se abordan los fundamentos teóricos y normativos que sustentan el uso de nanofibras de celulosa recicladas de sacos de cemento como aditivo para el hormigón. El propósito de este apartado es contextualizar el comportamiento del material desde el punto de vista de su composición, los procesos fisicoquímicos asociados a la hidratación del cemento y los principios del curado interno, junto con revisar las principales normas nacionales e internacionales que regulan la fabricación y desempeño del hormigón.

Asimismo, se examinan los antecedentes científicos relacionados con el empleo de nanofibras de celulosa en mezclas cementicias, considerando su influencia en propiedades como la trabajabilidad, la resistencia mecánica, la retención de humedad y la durabilidad. Se incluye una descripción de los mecanismos de interacción entre las fibras y la matriz cementicia, destacando los beneficios derivados de su capacidad para almacenar y liberar agua durante el proceso de hidratación.

Finalmente, se presentan las investigaciones más relevantes desarrolladas a nivel internacional y local, especialmente aquellas vinculadas a la reutilización de sacos de cemento como fuente de fibras celulósicas, lo que permite enmarcar el estudio dentro de los objetivos de sostenibilidad y economía circular que motivaron esta investigación.

2.2. Composición y propiedades del hormigón

El hormigón es un material compuesto, ampliamente utilizado en la construcción debido a su versatilidad, resistencia y durabilidad. Está formado principalmente por cemento, agua, áridos finos y gruesos, además de aditivos químicos o minerales que modifican sus propiedades en estado fresco y endurecido. La proporción de estos componentes determina el desempeño final del material, afectando su trabajabilidad, resistencia y durabilidad (Mehta y Monteiro, 2014).

De acuerdo con la NCh170:2016 Hormigón – Requisitos generales (Instituto Nacional de Normalización [INN], 2016), el hormigón se define como una mezcla homogénea de cemento, agua,

áridos y eventualmente aditivos, cuya dosificación debe garantizar la resistencia y durabilidad especificadas en proyecto. Esta norma establece los criterios de clasificación según resistencia característica, tipo de exposición y tamaño del árido. Mientras que la NCh1498:2022 Hormigón y mortero – Agua de amasado – Requisitos (INN, 2022) define la calidad del agua necesaria para asegurar una correcta hidratación del cemento y prevenir reacciones perjudiciales.

Los áridos constituyen entre un 60% y 80% del volumen total del hormigón y son responsables de proporcionar estabilidad dimensional y resistencia al desgaste. Según la NCh163:2024 Áridos para morteros y hormigones – Requisitos (INN, 2024), los áridos deben estar libres de impurezas, sales o materias orgánicas que alteren la adherencia con la pasta del cemento. La granulometría y forma de las partículas influyen directamente en la densidad, la cohesión y la trabajabilidad del material (Neville, 2011).

El cemento Portland, componente activo del hormigón, actúa como aglomerante hidráulico al reaccionar químicamente con el agua. Durante la hidratación, los silicatos y aluminatos de calcio forman productos de geles C-S-H (silicato de calcio hidratado) y portlandita [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], los cuales son responsables del desarrollo de la resistencia mecánica (Hewlett y Liska, 2019). En la Figura 2.1 se esquematizan las principales fases de hidratación del cemento Portland.

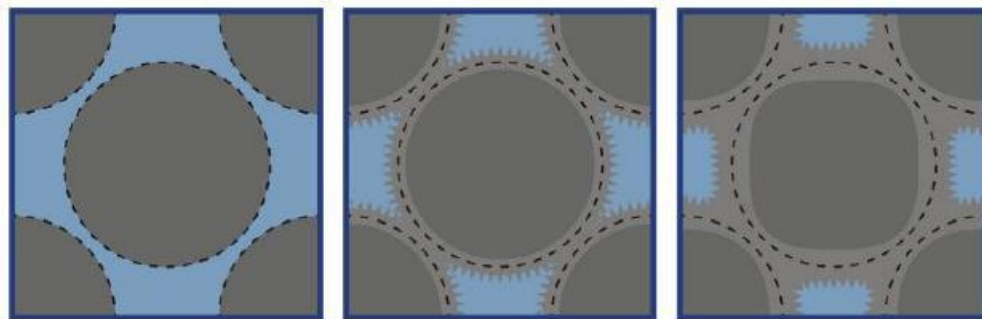


Figura 2.1 Hidratación de partículas de cemento Portland

Fuente: Hewlett y Liska (2019)

El agua de amasado cumple una doble función: Activar las reacciones de hidratación y otorgar la fluidez necesaria para la colocación del material. La relación agua/cemento (a/c) constituye el parámetro de mayor influencia en las propiedades mecánicas y de durabilidad. Relaciones a/c elevadas

aumentan la porosidad del hormigón, reduciendo su resistencia y durabilidad, mientras que relaciones muy bajas dificultan la trabajabilidad y el compactado (Kosmatka, Kerkhoff y Panarese, 2011).

En cuanto a los aditivos, estos pueden modificar la consistencia, el tiempo de fraguado o la retención de agua, permitiendo mejorar la manejabilidad y las condiciones de curado. En el contexto de este estudio, las nanofibras de celulosa recicladas se consideran un aditivo tipo especial, ya que interactúan físicamente con la matriz cementicia, influyendo en la retención de humedad interna y en la microestructura del hormigón endurecido.

Las principales propiedades del hormigón se dividen en dos grupos:

- En estado fresco, donde destacan la trabajabilidad, consistencia y segregación, reguladas por la NCh1019:2009 Determinación de la consistencia mediante el asentamiento de cono de Abrams (INN, 2009a).
- En estado endurecido, donde se evalúan la resistencia a la compresión, tracción, módulo elástico y permeabilidad. La NCh1037:2009 Ensayo de compresión de probetas cilíndricas de hormigón (INN, 2009b) establece el procedimiento estándar para determinar la resistencia a compresión.

Finalmente, la durabilidad del hormigón depende de su capacidad para resistir la acción de agentes físicos y químicos en el entorno. Factores como la calidad de los materiales, la relación a/c, el tipo de curado y la presencia de aditivos internos determinan la microestructura y grado de porosidad del material. El control adecuado de estas variables permite optimizar las propiedades del hormigón, lo que constituye la base para incorporar materiales innovadores como las nanofibras de celulosa recicladas en su composición.

2.3. Proceso de hidratación y curado del cemento

El comportamiento del hormigón en estado endurecido depende fundamentalmente del proceso de hidratación del cemento y de las condiciones de curado a las que se somete durante sus primeras etapas. Ambos fenómenos están estrechamente relacionados con el desarrollo de la resistencia, durabilidad y estabilidad volumétrica del material. Comprender estos mecanismos permite establecer

la base para el uso de aditivos internos, como las nanofibras de celulosa recicladas, que buscan optimizar la hidratación y el curado del hormigón.

2.3.1 Hidratación del cemento

El cemento Portland está compuesto principalmente por cuatro fases minerales denominadas alita (C_3S), velita (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF). Durante la hidratación, estas fases reaccionan con el agua para formar productos de hidratación, entre los cuales el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) es el principal responsable del desarrollo de la resistencia mecánica, mientras que la portlandita [$Ca(OH)_2$] contribuye al equilibrio químico del sistema (Scrivener y Nonat, 2011; Mehta y Monteiro, 2014).

La hidratación del cemento ocurre en varias etapas, una inicial de disolución rápida, seguida por un período de inducción en el que se forma una capa de gel alrededor de las partículas, posteriormente, una etapa de aceleración en la que se produce una rápida formación de C-S-H y un aumento de la temperatura, y finalmente, una fase de desaceleración en la que las reacciones continúan a menor ritmo (Hewlett y Liska, 2019).

Estos procesos generan una microestructura compleja compuesta por poros capilares y geles, cuya distribución depende de la relación agua/cemento, el tipo de cemento y las condiciones ambientales. Una hidratación incompleta, producto de una pérdida prematura de agua, reduce la continuidad del gel C-S-H y, por ende, la resistencia y durabilidad del hormigón (Neville, 2011).

2.3.2 Curado del hormigón

El curado se define como el conjunto de procedimientos destinados a mantener condiciones adecuadas de humedad, temperatura y tiempo que permitan la correcta hidratación del cemento (American Concrete institute [ACI], 2013). Un curado insuficiente o interrumpido produce microfisuras, retracción plástica, pérdida de resistencia y una microestructura más porosa, lo que disminuye significativamente la durabilidad del material (Neville, 2011).

Tradicionalmente, el curado interno se realiza por medios externos, como la aplicación de agua superficial, láminas impermeables o compuestos sellantes. Sin embargo, en estructuras masivas o en condiciones ambientales adversas, estos métodos pueden resultar ineficaces debido a la rápida evaporación o la dificultad para mantener la humedad durante periodos prolongados (Mehta y Monteiro, 2014).

En respuesta a estas limitaciones, se ha desarrollado el concepto de curado interno, el cual busca suministrar agua adicional desde el interior de la mezcla mediante el uso de materiales que actúan como agentes de almacenamiento y liberación controlada de agua. Entre estos materiales se incluyen agregados ligeros prehumedecidos, superabsorbentes poliméricos y nanofibras de celulosa. Estos aditivos absorben agua durante el mezclado y la liberan progresivamente a medida que el cemento se hidrata, reduciendo la contracción autógena y promoviendo un grado de hidratación más uniforme (Hisseine *et al.*, 2019).

En el contexto de este estudio, las nanofibras de celulosa recicladas cumplen un rol equivalente, ya que su estructura altamente porosa y su superficie hidrofílica les permiten absorber una cantidad significativa de agua y liberarla gradualmente. Este comportamiento facilita la hidratación más completa del cemento, mejora la cohesión interna del hormigón y disminuye la formación de microfisuras. Además, al provenir de un residuo industrial, su uso contribuye a una alternativa de curado interna más sostenible y económicamente viable.

2.4. Durabilidad del hormigón y mecanismos de deterioro

La durabilidad del hormigón se define como la capacidad del material para resistir, durante su vida útil, las acciones de agentes físicos y químicos del entorno sin experimentar deterioros significativos que afectan su integridad estructural o funcional (ACI, 2016). Este concepto implica no solo la resistencia mecánica inicial, sino también la conservación de sus propiedades frente a la exposición prolongada a condiciones ambientales agresivas, tales como la presencia de humedad, cloruros, dióxido de carbono, sulfatos, variaciones térmicas o ciclos de congelamiento y deshielo (Neville, 2011; Mehta y Monteiro, 2014). La durabilidad, junto con la resistencia, constituyen uno de los pilares fundamentales que determinan la vida útil de las estructuras de hormigón, entendida como el período durante el cual el material mantiene sus condiciones de servicio sin intervenciones significativas.

La durabilidad del hormigón está determinada principalmente por su microestructura, la cual depende del grado de hidratación del cemento, la calidad de los materiales utilizados, la relación agua/cemento y las condiciones de curado.

La permeabilidad, entendida como la facilidad con que los agentes externos pueden penetrar la matriz cementicia, constituye uno de los factores más determinantes. Una baja permeabilidad implica una estructura más compacta y menos susceptible a la corrosión del acero embebido o a la degradación química (Hewlett y Liska, 2019).

Entre los mecanismos más comunes de deterioro del hormigón destacan:

- Carbonatación, producida por la reacción del dióxido de carbono con la portlandita, que reduce la alcalinidad del hormigón y favorece la corrosión del acero de refuerzo.
- Penetración de cloruros, que puede provocar corrosión localizada del acero, especialmente en ambientes marinos o donde se emplean sales descongelantes.
- Ataques por sulfatos, provocado por la penetración de iones de sulfato desde el suelo o el agua, que reaccionan con los aluminatos y la portlandita del cemento formando productos expansivos, principalmente etringita y yeso.
- Reacción álcali-sílice (RAS), provocada por la interacción entre los álcalis del cemento y agregados reactivos, originando micro fisuras internas.
- Ciclos de congelamiento y deshielo, que inducen presiones internas por la expansión del agua al congelarse, debilitando la matriz cementicia.

De los mecanismos de deterioro descritos, la carbonatación y la penetración de cloruros, y en menor medida el ataque por sulfatos, se encuentran directamente asociados a la porosidad y permeabilidad del hormigón, ya que dependen del transporte de agentes agresivos a través de la red capilar. En este contexto, la incorporación de nanofibras de celulosa puede contribuir a mitigar estos mecanismos al favorecer un mayor grado de hidratación y una microestructura más refinada, reduciendo la conectividad de los poros capilares.

El curado desempeña un papel fundamental en la durabilidad, ya que una hidratación incompleta conduce a una red capilar más continua, lo que incrementa la permeabilidad y facilita la penetración

de agentes dañinos. Por el contrario, un curado adecuado promueve la formación de un gel C-S-H más denso y una microestructura menos porosa, aumentando la resistencia a la difusión de gases y líquidos (Scrivener y Nonat, 2011; Neville, 2011).

En este contexto, los métodos convencionales de curado externo pueden resultar insuficientes, especialmente en ambientes áridos o en estructuras de gran volumen, donde la evaporación del agua o la imposibilidad de mantener condiciones constantes de humedad reducen la eficacia del proceso (Mehta y Monteiro, 2014). Frente a esta limitación, el curado interno se presenta como una alternativa eficaz para mejorar la durabilidad, al suministrar agua adicional desde el interior de la mezcla.

Los aditivos con capacidad de retención y liberación controlada, como las nanofibras de celulosa, contribuyen directamente a reducir la formación de microfisuras. Estos materiales actúan como microdepósitos de humedad que liberan agua durante la hidratación, promoviendo una estructura más compacta y homogénea. La presencia de nanofibras también favorece la resistencia al ingreso de agentes agresivos y al desarrollo de la retracción autógena, lo que incrementa la vida útil del hormigón.

La durabilidad del hormigón puede evaluarse mediante ensayos que caracterizan su microestructura y su capacidad de absorción. Entre ellos destacan la absorción capilar, que mide la tasa de ingreso de agua por capilaridad, y el ensayo de pérdida por ignición (LOI), que permite estimar el grado de hidratación del cemento a partir del contenido de humedad.

En particular, la absorción capilar constituye un método sensible para evaluar la permeabilidad y la porosidad efectiva del hormigón. Según Taus (2003), este ensayo permite determinar la tasa de absorción capilar o sorptividad (S), mediante la relación entre la masa de agua absorbida por unidad de área y la raíz cuadrada del tiempo. Dicho parámetro se considera un indicador de durabilidad, dado que refleja la capacidad del material para resistir el ingreso de fluidos a través de su red capilar. Ambos ensayos se utilizarán en este estudio para evaluar la eficiencia del curado interno y su impacto en la durabilidad del material.

2.5. Nanofibras de celulosa

2.5.1 Origen y estructura de la celulosa

La celulosa es el polímero natural más abundante en la Tierra y constituye el componente estructural principal de las paredes celulares de las plantas. Está formada por unidades repetitivas de β -D-glucosas unidas mediante enlaces β (1 $\rightarrow$ 4) glucosídicos, generando una cadena lineal de alta cristalinidad y resistencia (Klemm *et al.*, 2011).

Las moléculas de celulosa se agrupan formando microfibrillas, las cuales, a su vez, se ensamblan en fibrillas y fibras a diferentes escalas jerárquicas. Esta organización confiere a la celulosa una combinación única de rigidez, ligereza y capacidad de formar enlaces de hidrógeno, propiedades que la convierten en un material versátil para aplicaciones industriales y de ingeniería. En la Figura 2.5 se muestra esquemáticamente la estructura jerárquica de la celulosa, destacando las dimensiones relativas entre fibras, microfibrillas y nanofibras.

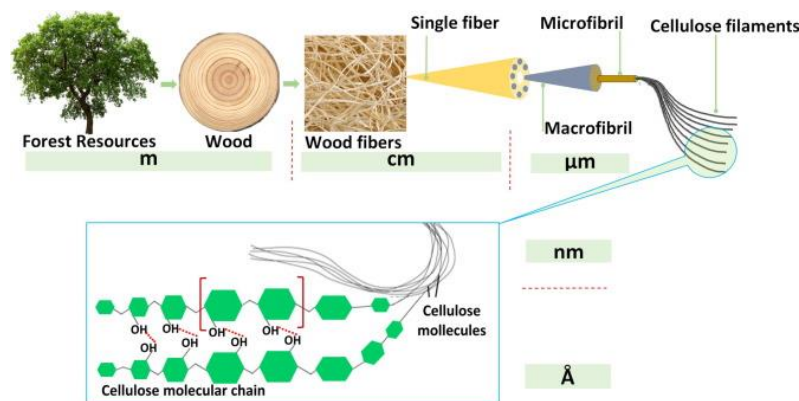


Figura 2.2 Estructura jerárquica de la celulosa

Fuente: Hisseine *et al.* (2019)

2.5.2 Nanofibras de celulosa: Obtención y clasificación

Las nanofibras de celulosa (CNF) son materiales de origen natural obtenidos a partir del desmenuzamiento de fibras vegetales mediante procesos mecánicos, químicos o enzimáticos, hasta alcanzar diámetros del orden de los 10 a 100 nanómetros y longitudes de varios micrómetros. Estas dimensiones confieren una alta relación de su aspecto (longitud/diámetro) y una gran área superficial específica, lo que mejora su interacción con las matrices cementicias (Klemm *et al.*, 2011; Mejdoub *et al.*, 2016).

Según su morfología, se distinguen principalmente dos tipos de nanocelulosas:

- Nanofibras de celulosa (CNF): Estructuras flexibles con regiones amorfas y cristalinas interconectadas, obtenidas mediante fibrilación mecánica intensiva o tratamientos combinados (oxidación TEMPO, homogeneización a alta presión, molienda coloidal).
- Nanocristales de celulosa (CNC): Partículas rígidas y altamente cristalinas, producidas generalmente por hidrólisis ácida controlada, con longitudes de 100 a 300 nanómetros y diámetros entre 5 y 20 nanómetros (Habibi *et al.*, 2010; Moon *et al.*, 2011).

En ambos casos, las nanocelulosas presentan características hidrofílicas debido a la presencia de grupos hidroxilo (-OH) en su superficie, lo que permite una fuerte interacción con el agua y con matrices polares como la del cemento. Esta afinidad promueve su capacidad para retener agua y liberarla gradualmente, lo que resulta de especial interés para su aplicación en procesos de curado interno del hormigón.

2.5.3 Propiedades fisicoquímicas relevantes

Las nanofibras de celulosa se caracterizan por una combinación de propiedades que las distinguen de las fibras convencionales. Su alta cristalinidad les otorga estabilidad térmica y rigidez, mientras que su estructura amorfa parcial contribuye a la flexibilidad y capacidad de dispersión en medios acuosos (Onuaguluchi y Banthia, 2016).

La superficie rica en grupos hidroxilo permite la formación de extensas redes de puentes de hidrógeno, generando una estructura tridimensional capaz de retener grandes volúmenes de agua. Esta característica es fundamental para su función como agente de curado interno, ya que el agua almacenada en las fibras puede liberarse lentamente durante el curado del cemento, mejorando el grado de hidratación y reduciendo la contracción autógena (Hisseine *et al.*, 2019).

Desde el punto de vista mecánico, las nanocelulosas presentan módulos de elasticidad superiores a 100 GPa y resistencias a la tracción en el rango de 1–2 GPa, valores obtenidos a partir de caracterizaciones ampliamente estudiadas en la literatura científica (Moon *et al.*, 2011; Habibi *et al.*, 2010). Estudios recientes han demostrado además que su incorporación en matrices cementicias

modifica la reología del sistema, aumentando la viscosidad y la cohesión sin generar segregación, lo que mejora la estabilidad del hormigón fresco (Mejdoub *et al.*, 2016; Parveen *et al.*, 2013).

2.5.4 Aplicaciones en materiales cementicios

En los últimos años, la aplicación de nanofibras de celulosa en matrices cementicias ha despertado gran interés por su capacidad para mejorar la microestructura y el desempeño global del hormigón. Su efecto puede resumirse en tres mecanismos principales:

1. Curado interno: las nanofibras actúan como reservorios de agua que compensan la pérdida de humedad interna, favoreciendo la hidratación continua del cemento.
2. Refuerzo microestructural: las CNF se distribuyen dentro de la matriz cementicia, uniendo zonas de transición interfacial y limitando la propagación de microfisuras.
3. Optimización de la durabilidad: al reducir la porosidad capilar y mejorar la cohesión, se limita la penetración de agentes agresivos y se prolonga la vida útil del material (Hisseine *et al.*, 2019; Onuaguluchi y Banthia, 2016).

En la Figura 2.6 se ilustra el mecanismo de acción de las nanofibras de celulosa dentro de la matriz cementicia, donde se observa su rol en la retención de agua, formación de puentes físicos y consolidación de la microestructura.

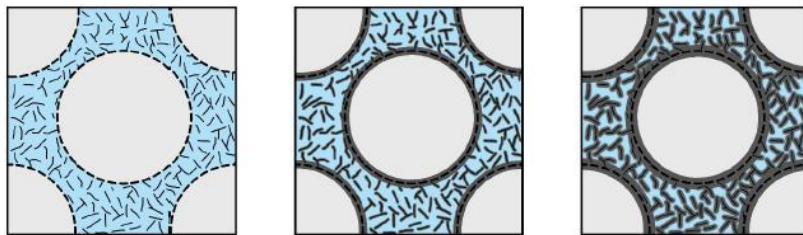


Figura 2.3 Esquema de hidratación del cemento con NFC

Fuente: Leiton (2021)

Diversos estudios han demostrado que la incorporación de nanofibras de celulosa, incluso en bajas concentraciones (0,05 – 0,2 % en peso de cemento), puede aumentar la resistencia a la compresión

entre un 5 % y un 15 %, mejorar la hidratación y disminuir la permeabilidad (Parveen *et al.*, 2013; Mejdoub *et al.*, 2016; Onuaguluchi & Banthia, 2016; Hisseine *et al.*, 2019). Estos resultados respaldan su potencial como aditivo multifuncional, especialmente en el desarrollo de hormigones más durables y sostenibles.

Los antecedentes reportados en la literatura internacional han servido como base para el desarrollo de investigaciones posteriores en el Laboratorio de Hormigones de la Universidad de Concepción, permitiendo consolidar los rangos de adición de nanofibras de celulosa y reconocer su potencial como aditivo funcional en matrices cementicias.

2.6. Nanofibras de celulosa recicladas a partir de sacos de cemento

El presente estudio se desarrolla bajo la óptica de la economía circular para la construcción, buscando la valorización de residuos industriales en consonancia con los principios de la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor (Ley REP). En este marco, se emplean nanofibras lignocelulósicas, un aditivo desarrollado en la Universidad de Concepción (UdeC), obtenido a partir de sacos de cemento posconsumo.

El uso de estos sacos de papel kraft multicapa es de especial interés, ya que su composición garantiza una fuente de fibras lignocelulósicas de alta pureza y potencial para su revalorización como material de refuerzo y curado interno en hormigones.

2.6.1 Metodología de obtención de las nanofibras

La producción de las NFC se fundamentó en la metodología desarrollada en la Universidad de Concepción, la cual se llevó a cabo en dos fases principales: la recuperación y limpieza de la fibra, y posteriormente, su fibrilación a escala nanométrica. Esto se explica en detalle en el Anexo 2.1, donde, además, se muestra la comparación de estudios previos realizados en la Universidad de Concepción por parte de Cifuentes (2024), Aroca (2025) y Muñoz (2025).

2.6.2 Brecha identificada

La literatura existente se ha centrado principalmente en nanofibras de celulosa vírgenes, de un único tipo morfológico y aplicadas mayoritariamente en morteros o pastas de laboratorio. En cambio, existe poca información sobre su efecto en hormigones estructurales, especialmente cuando se utilizan combinaciones de fibras de distinto tamaño obtenidas desde fuentes recicladas, como sacos de cemento posconsumo.

También son escasos los estudios que integran simultáneamente indicadores de curado interno y durabilidad, considerando propiedades como la absorción capilar y la pérdida por ignición para estimar el grado de hidratación.

Ante esta brecha, la investigación evalúa experimentalmente el efecto de nanofibras recicladas con distintas proporciones morfológicas sobre el curado interno, la durabilidad y la resistencia del hormigón, aportando al desarrollo de materiales más sustentables y a la consolidación de la línea de investigación en nanomateriales de la Universidad de Concepción.

2.7. Conclusiones

La revisión del estado del arte permitió establecer que la durabilidad y el desempeño mecánico del hormigón dependen directamente de la calidad de su microestructura, la cual se define por los procesos de hidratación del cemento y las condiciones de curado. En este marco, la literatura destaca que materiales con capacidad de retención y liberación de agua pueden favorecer la hidratación interna y reducir la formación de microfisuras asociadas a la retracción autógena (Hisseine *et al.*, 2019; Mejdoub *et al.*, 2016). Estos mecanismos resultan especialmente relevantes para mejorar la densificación del gel hidratado y disminuir la permeabilidad capilar, atributos clave para la vida útil del hormigón.

A nivel local, los estudios desarrollados en la Universidad de Concepción (Cifuentes, 2024; Aroca, 2025; Muñoz, 2025) han demostrado la viabilidad técnica del uso de nanofibras de celulosa recicladas como aditivo funcional en morteros y hormigones, destacando su potencial para actuar como agentes de curado interno. Estas investigaciones evidencian que la incorporación de nanofibras contribuye a mejorar la resistencia a la compresión y la estabilidad microestructural, posicionándolas como una

alternativa sustentable alineada con los principios de economía circular y valorización de residuos industriales.

El análisis conceptual realizado en este capítulo permitió comprender los fundamentos fisicoquímicos asociados al transporte de agua, la hidratación progresiva del cemento y los efectos del curado interno, proporcionando el marco necesario para interpretar el comportamiento de las mezclas evaluadas experimentalmente. Asimismo, se identificó la necesidad de estudiar combinaciones específicas de nanofibras con diferentes morfologías (particularmente las fibras TG y TP) para determinar de qué manera su proporción influye en la trabajabilidad, la hidratación y la durabilidad del hormigón.

En conjunto, esta revisión teórica sustenta la pertinencia de evaluar mezclas con nanofibras de celulosa recicladas bajo distintos escenarios experimentales y justifica el enfoque adoptado en esta investigación. Sobre esta base, el siguiente capítulo presenta el plan experimental diseñado para cuantificar el efecto de proporciones TG–TP en parámetros clave de desempeño, estableciendo los procedimientos, materiales y ensayos utilizados en la presente memoria.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1. Introducción

En este capítulo se describe el plan experimental desarrollado para evaluar el efecto de la incorporación de nanofibras de celulosa recicladas (NFC) en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón. Se detallan los materiales utilizados, el diseño de mezclas, los procedimientos de confección y curado, y los ensayos realizados, todos orientados a determinar la influencia de las NFC en el curado interno y la microestructura del material.

Los materiales empleados fueron seleccionados conforme a las normas chilenas vigentes (NCh163:2021, NCh1498:2022, NCh170:2016). Los ensayos experimentales se efectuaron en el Laboratorio de Hormigones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, garantizando la reproducibilidad y confiabilidad de los resultados que se presentan en las secciones siguientes.

3.2. Materiales utilizados

El hormigón está compuesto por áridos que son aglomerados por una pasta de cemento que se forma al mezclar cemento y agua. El Anexo 3.1 presenta una descripción de estos tres compuestos principales. Además, esta mezcla cementicia puede tener aditivos químicos que mejoran alguna propiedad o aditivos físicos, tal como las nanofibras de celulosa, que aportan hidratación interna a la pasta de cemento. A continuación, se presenta sucintamente las nanofibras que se utilizaron en este estudio.

3.2.1 Nanofibras de celulosa

El aditivo empleado en esta investigación corresponde a nanofibras de celulosa. Estas fueron obtenidas y suministradas por el Laboratorio de Productos Forestales (LPF) de la Universidad de Concepción, mediante un proceso enzimático-mecánico de desfibrilación a partir de sacos de cemento posconsumo.

Este procedimiento, descrito detalladamente en el Anexo 2.1 y referenciado en trabajos como Aroca (2025) y Cifuentes (2024), consistió en las etapas de limpieza, desfibrilado, refinación y homogeneización a alta presión. El proceso generó suspensiones acuosas de NFC con distintas morfologías.

Para el diseño experimental, se seleccionaron dos morfologías principales de los lotes de nanofibras caracterizados:

TG (Tamaño grande): Lote denominado NFC T1 en la caracterización. Sus dimensiones son: Largo aparente aproximado de $18.85\mu\text{m}$ y diámetro promedio de 126 nm. Este material actúa principalmente como filler fibroso.

TP (Tamaño pequeño): Lote denominado NFC T3 en la caracterización. Sus dimensiones son: Largo aparente aproximado de $5.01\mu\text{m}$ y diámetro promedio de 20 nm. Este material cumple el rol de agente de curado interno y refuerzo a escala nanométrica.

Las NFC fueron empleadas en tres combinaciones proporcionales: 80%TG–20%TP, 50%TG–50%TP y 20%TG–80%TP, con dos concentraciones de adición: 0,05 % y 0,1 % respecto al peso del cemento. Las suspensiones presentaron apariencia lechosa, con buena estabilidad y dispersabilidad tras agitación manual.

3.3. Diseño de mezclas y plan experimental

El diseño de mezclas se elaboró con el objetivo de evaluar el efecto de la incorporación de nanofibras de celulosa recicladas sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón, manteniendo constantes las proporciones base de los materiales convencionales.

Para todas las mezclas se utilizó una relación agua/cemento (a/c) de 0.50, definida a partir de ensayos preliminares realizados en el Laboratorio de Hormigones de la Universidad de Concepción, la cual permitió alcanzar una trabajabilidad adecuada y una resistencia mecánica representativa de un hormigón estructural convencional.

El cemento, los áridos y el agua mantuvieron proporciones fijas en todas las confecciones, mientras que las variaciones se introdujeron únicamente en la composición y concentración de las nanofibras de celulosa (NFC).

3.3.1 Mezclas y nomenclatura

Se diseñaron un total de siete tipos de mezclas, considerando una mezcla patrón sin aditivo y seis mezclas con NFC en distintas proporciones morfológicas (TG = tamaño grande y TP = Tamaño pequeño) y concentraciones (0,05 % y 0,1 % respecto al peso del cemento).

Para la identificación de las mezclas se adoptó la siguiente nomenclatura.

$$M - AXY - C \quad (31)$$

Donde:

- M: Mezcla.
- A: Aditivo.
- X: Porcentaje de proporción nanofibra de celulosa tamaño grande (TG).
- Y: Porcentaje de proporción nanofibra de celulosa tamaño pequeño (TP).
- C: Porcentaje de adición nanofibra de celulosa.

Por ejemplo: M-A8020-0.1, corresponde a mezcla con 80% TG y 20% TP, en una concentración de 0.1%.

3.3.2 Dosificación base

Las mezclas fueron diseñadas en base a una dosificación patrón, manteniendo un volumen equivalente de seis especímenes por colada, según el formato de moldes cilíndricos de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, conforme a los lineamientos de la NCh1037:2009.

Todas las mezclas se elaboraron con una relación agua/cemento (a/c) constante de 0.50, valor definido a partir de ensayos preliminares de laboratorio realizados previo al programa experimental, en donde, esta relación a/c permitió obtener una trabajabilidad adecuada y reproducible. Esta se consideró adecuada cuando la mezcla patrón alcanzó un asentamiento de cono de Abrams comprendido entre 6 y 7 centímetros, rango correspondiente a una consistencia blanda.

La dosificación base se utilizó como referencia para todas las confecciones realizadas durante el programa experimental. En las coladas posteriores se efectuaron únicamente ajustes menores de agua, correspondientes a la corrección por humedad superficial de los áridos, según los valores determinados en los ensayos de caracterización (Sección 4.2.1).

En la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 se presentan las proporciones base de materiales utilizadas para las mezclas con adiciones de 0,05 % y 0,1 % de nanofibras de celulosa (NFC), respectivamente.

Tabla 3.1 Dosificación base porcentaje de adición 0.05%

Mezcla	Patrón	M-A5050-0.05	M-A8020-0.05	M-A2080-0.05
Cemento [Kg]	15.6	15.6	15.6	15.6
Arena [Kg]	28.4	28.4	28.4	28.4
Agua [Kg]	7.75	7.3	7.3	7.3
Gravilla [Kg]	36.3	36.3	36.3	36.3
Nanofibra TG	-	0.225	0.36	0.09
Nanofibra TP	-	0.225	0.09	0.36
Relación a/c	0.50	0.50	0.50	0.50

Tabla 3.2 Dosificación base porcentaje de adición 0.1%

Mezcla	Patrón	M-A5050-0.1	M-A8020-0.1	M-A2080-0.1
Cemento [Kg]	15.6	15.6	15.6	15.6
Arena [Kg]	28.4	28.4	28.4	28.4
Agua [Kg]	7.75	6.85	6.85	6.85
Gravilla [Kg]	36.3	36.3	36.3	36.3
Nanofibra TG	-	0.45	0.72	0.18
Nanofibra TP	-	0.45	0.18	0.72
Relación a/c	0.50	0.50	0.50	0.50

Las demás dosificaciones utilizadas en las distintas coladas, elaboradas a partir de estas mezclas base, se encuentran detalladas en el Anexo 3.2.

3.3.3 Cronología de confecciones y ensayos

El desarrollo experimental se llevó a cabo en seis etapas principales de confección, según se muestra en la Tabla 3.3. Cada colada fue destinada a un conjunto de ensayos específicos y a edades de curado definidas, obteniéndose en cada mezcla elaborada un total de seis especímenes, de acuerdo con el volumen de confección establecido.

Las primeras dos confecciones (14 y 16 de mayo de 2025) se centraron en la comparación inicial de mezclas con NFC, mientras que las posteriores (junio a julio) se enfocaron en ensayos de larga duración, verificación y durabilidad, reduciendo progresivamente el número de mezclas al observarse mejor comportamiento en la proporción TG 50% – TP 50%.

Tabla 3.3 Cronología confecciones

Fecha	Confección	Mezclas elaboradas	Ensayos realizados	Edades de ensayo
14/05/2025	1 ^a confección	Patrón M-A5050-0.05 M-A8020-0.05 M-A2080-0.05	Cono de Abrams Compresión LOI	7, 14, 28 días
16/05/2025	2 ^a confección	Patrón M-A5050-0.1 M-A8020-0.1 M-A2080-0.1	Cono de Abrams Compresión LOI	7, 14, 28 días
04/06/2025	3 ^a confección	Patrón M-A5050-0.05 M-A8020-0.05 M-A2080-0.05	Cono de Abrams Compresión LOI	28, 56, 90 días
17/06/2025	4 ^a confección	Patrón M-A5050-0.05 M-A5050-0.1	Cono de Abrams Compresión	7, 14, 28 días
18/07/2025	5 ^a confección	Patrón M-A5050-0.05	Cono de Abrams Compresión Absorción capilar	7, 28 días
30/07/2025	6 ^a confección	Patrón M-A5050-0.05	Cono de Abrams Compresión Absorción capilar	7, 28 días

(*) LOI: *Loss on Ignition*.

El diseño experimental permitió evaluar el comportamiento de las mezclas tanto en su fase inicial de fraguado como durante el proceso de endurecimiento, garantizando la repetibilidad de los resultados al mantener condiciones de fabricación uniformes.

Los resultados obtenidos de estas confecciones se analizarán en el Capítulo 4, en función de las propiedades medidas a distintas edades de curado, para determinar la mezcla óptima en términos de resistencia mecánica y durabilidad.

3.4. Métodos de ensayo

En esta sección se describen los métodos experimentales aplicados a las mezclas elaboradas, conforme a las normas chilenas vigentes y a referencias bibliográficas especializadas. Los procedimientos que miden la propiedad física de fluidez en estado fresco y resistencia mecánica a la compresión en estado endurecido se presentan en el Anexo 3.3. A continuación, se presentan los ensayos de pérdida por ignición (LOI) y absorción capilar. Todos los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Hormigones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción.

3.4.1 Ensayo de pérdida por ignición (LOI)

El ensayo de pérdida por ignición (*Loss on Ignition*, LOI) se aplicó para determinar el contenido de compuestos volátiles y estimar el grado de hidratación del cemento presente en las mezclas de hormigón con nanofibras de celulosa. Las muestras analizadas correspondieron a fragmentos de hormigones pertenecientes a la quinta tanda de producción, elaborados con nanofibras provenientes del Laboratorio de Productos Forestales (LPF-UdeC).

El procedimiento experimental fue realizado en el Laboratorio de Materiales del LPF, siguiendo las condiciones establecidas por la práctica estándar interna del laboratorio, y consistió en las siguientes etapas:

- Secado inicial: Las muestras recibidas en forma de polvo se secaron en estufa a 105 °C durante al menos 24 horas, asegurando la eliminación de humedad libre. Posteriormente, se almacenaron en bolsas selladas para evitar reabsorción de humedad.
- Preparación de crisoles: Los crisoles se lavaron y secaron a 105 °C (*overnight*), y luego se pesaron una vez fríos para registrar su masa inicial (m_C).

- Pesaje de la muestra seca: Se tomaron entre 3 y 4 gramos de muestra seca de cada hormigón o mortero. La muestra y el crisol se pesaron conjuntamente (m_1).
- Calcinación: Los crisoles con muestra se introdujeron en una mufla eléctrica del LPF a una temperatura de 1000 °C, manteniéndose durante un tiempo mínimo de 4 horas (overnight) para asegurar la completa descomposición de los compuestos volátiles.
- Enfriamiento y pesaje final: Finalizada la calcinación, los crisoles se enfriaron en la mufla hasta 150–180 °C, y posteriormente se trasladaron a un desecador hasta alcanzar temperatura ambiente. Luego, se pesaron nuevamente (m_2).

La pérdida por ignición (*Loss on Ignition*) corresponde al porcentaje de masa eliminada por calcinación de la muestra a alta temperatura, y se asocia principalmente a la evaporación del agua químicamente combinada en los productos de hidratación del cemento. Por lo tanto, LOI es un parámetro indirecto del avance de la hidratación en el hormigón: cuanto mayor es la pérdida de masa durante la calcinación, mayor cantidad de compuestos hidratados permanecen en la pasta y menor es la fracción anhidra remanente.

El valor se obtuvo mediante la comparación entre la masa de la muestra seca y su masa después de la calcinación, de acuerdo con la Ecuación 3.2.

$$LOI(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad (32)$$

Donde:

m_1 : Masa con muestra seca (g)

m_2 : Masa con muestra calcinada (g)

A partir de este valor, se estimó el *degree of hydration* (grado de hidratación; DoH según sus iniciales en inglés) del cemento, entendiendo que el LOI representa la fracción de agua combinada y productos hidratados presentes en el hormigón. Dado que el valor teórico asociado a una hidratación completa corresponde aproximadamente a un 23%, se aplicó la relación:

$$DOH (\%) = \frac{LOI}{0.23} \times 100 \quad (33)$$

El DoH permite expresar directamente el porcentaje de cemento que ha reaccionado en el material, entregando un indicador más claro y comparativo del desempeño del hormigón. Por este motivo, aunque el ensayo ejecutado experimentalmente corresponde a LOI, la discusión de resultados se presenta en función de DoH, ya que este parámetro resume el avance real de hidratación y facilita el análisis de la influencia de las nanofibras de celulosa en el desarrollo microestructural del material. Este procedimiento permitió cuantificar la masa de compuestos volátiles liberados por la deshidratación e ignición, proporcionando un parámetro del grado de hidratación del cemento en las mezclas con y sin adición de nanofibras.



Figura 3.1 Extracción de muestra para ensayo LOI

3.4.2 Ensayo de absorción capilar

La absorción capilar se empleó como indicador del grado de permeabilidad y compactación del hormigón, así como de la eficiencia del curado interno proporcionado por las nanofibras de celulosa (NFC).

El procedimiento aplicado se basó en los lineamientos de Taus (2003) y la norma ASTM C1585 – *Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*, con adecuaciones a las condiciones de laboratorio y a la geometría de las probetas.

Se utilizaron dos probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura por tipo de confección o “colada”, elaboradas según la NCh 1017:2016 – Confección y curado de probetas de hormigón. Se tuvieron seis especímenes cilíndricos en total para este ensayo. Se hizo un control de resistencia compresión a 7 días (2 especímenes) y 28 días (dos especímenes) de curado, para verificar la correcta fabricación de las probetas.

Tras 28 días de curado en cámara húmeda (20 ± 2 °C, HR > 95 %), cada cilindro se cortó transversalmente mediante sierra diamantada refrigerada por agua, obteniendo discos de $15 \text{ cm} \pm 5$ mm de espesor.

Cada cilindro original generó así dos especímenes de ensayo:

- Probeta inferior (INF): corresponde al disco ubicado en la parte inferior del molde original.
- Probeta superior (SUP): corresponde al disco obtenido desde la parte superior del mismo cilindro

Posteriormente, las caras de los discos fueron rectificadas para garantizar superficies planas, paralelas y libres de irregularidades, condición necesaria para asegurar el contacto uniforme con el agua durante el ensayo y la precisión en las mediciones de masa.

Posteriormente, las probetas se secaron en horno a 65 ± 3 °C durante 3 días, y se estabilizaron a temperatura ambiente durante 1 hora.

Luego, se procedió al sellado con parafina sólida fundida (mediante la técnica de calentamiento lento e indirecto conocido como “baño María”), aplicada sobre la superficie seca y limpia para impermeabilizar las caras no expuestas. El sellado se realizó de la siguiente forma:

- En la probeta inferior (INF) se sellaron las caras laterales y la cara de corte, dejando libre la cara que estuvo en contacto con el molde, la cual fue designada como la superficie expuesta al agua durante el ensayo.

- En la probeta superior (SUP) se sellaron igualmente las caras laterales y la cara de corte, dejando descubierta la cara superior (cara de llenado del cilindro), que se utilizó como superficie de exposición al agua.

Este procedimiento evita filtraciones laterales y evaporación superficial, asegurando un flujo unidireccional conforme a la ASTM C1585-20, que exige el uso de un sellante impermeable adecuado. El uso de parafina sólida fundida como agente de impermeabilización se encuentra sólidamente respaldado en el ámbito de la ingeniería de materiales. Específicamente, la norma AASHTO T 275 (Método de Ensayo Estándar para la Gravedad Específica Aparente de Mezclas Bituminosas Compactadas Usando Probetas Recubiertas con Parafina) reconoce su efectividad para crear una barrera hidrostática completa y rápida alrededor de la probeta.

A continuación, se presenta un esquema representativo del montaje del ensayo y una imagen del ensayo en sí.

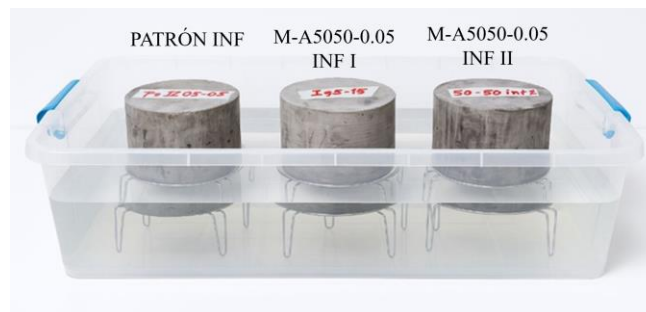


Figura 3.2 Montaje ensayo absorción por capilaridad

El procedimiento se realizó siguiendo los lineamientos de la ASTM C1585-20, con adaptaciones de registro y control propias del laboratorio UdeC. El registro de masas se efectuó en tres etapas, con el fin de garantizar la precisión y trazabilidad del ensayo:

- Pesaje inicial previo al secado: Se registró la masa original de la probeta tal como fue retirada del curado, antes de ingresar al horno.
- Pesaje post-secado: Una vez transcurridos los 3 días de secado en horno a 65 ± 3 °C, se volvió a pesar la muestra para obtener la masa seca.

- Pesaje post-sellado: Tras aplicar la parafina líquida fundida y dejarla solidificar, se efectuó una nueva pesada para determinar la masa total sellada (m_0 , sellada), la cual corresponde a la masa de referencia utilizada en el cálculo de absorción durante el ensayo.

Una vez determinada la masa base, se procedió a la medición gravimétrica según los intervalos de tiempo definidos. Las probetas se colocaron sobre la rejilla metálica nivelada, dentro del recipiente plástico con agua a temperatura ambiente, asegurando un nivel de inmersión de 2–3 cm sobre la cara inferior expuesta. El cronómetro se activó en el instante de contacto con el agua ($t = 0$).

Durante el ensayo, se efectuaron los pesajes según los siguientes intervalos de tiempo:

Luego de ($t=0$) las mediciones fueron tomadas en los siguientes instantes en minutos: 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240, 480, 720, 1440, 2880, 4320, 7200, 8640, 10080, 12960, 15840, 17280.

En cada intervalo, La probeta se retiró cuidadosamente del agua, se secó suavemente la superficie húmeda con toalla de papel, se pesó en una balanza, y se devolvió al agua en un tiempo máximo de 15 s para evitar pérdida de humedad.

Durante el ensayo se verificó, por cada día transcurrido, el nivel del agua y la estabilidad de los soportes.

El procedimiento de cálculo se realizó siguiendo las directrices establecidas en la norma ASTM C1585-20, manteniendo su formulación original, pero con un enfoque orientado a la determinación de la sorptividad secundaria (S_s).

Para cada probeta se determinó la absorción acumulada en función del tiempo mediante la siguiente ecuación:

$$I = \frac{m_t - m_0}{a \cdot d} \quad (34)$$

Donde:

- I : Absorción (mm).

- $m_t - m_0$: Cambio de masa de la probeta en el tiempo t (g).
- a : Área expuesta de la probeta (mm^2).
- d : Densidad del agua a $4\text{ }^\circ\text{C}$ (0.001 g/mm^3).

3.5. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental se desarrolló con el objetivo de evaluar el efecto de la incorporación de nanofibras de celulosa (NFC) recicladas sobre las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón. Todas las etapas del proceso se realizaron en el Laboratorio de Hormigones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción.

3.5.1 Preparación de materiales

Los materiales empleados fueron los descritos en la Sección 3.2. Los áridos se utilizaron tal como fueron adquiridos, sin tamizado adicional, realizando únicamente la corrección de humedad superficial obtenida en los ensayos de caracterización.

Las nanofibras de celulosa (TG y TP) se prepararon en suspensión acuosa. Para su incorporación, se mezcló directamente la cantidad correspondiente de nanofibras con el agua de amasado total, revolviendo brevemente hasta lograr una dispersión uniforme. Esta mezcla agua–NFC se agregó completamente al hormigón durante la etapa de mezclado.

Todos los materiales fueron pesados individualmente antes del proceso de amasado, en condiciones de temperatura y humedad ambiente, con valores promedio de $20 \pm 3\text{ }^\circ\text{C}$.

3.5.2 Mezclado de hormigón

El amasado se realizó en una mezcladora eléctrica de eje inclinado. Se incorporaron en primer lugar los áridos finos y gruesos junto con el cemento, y posteriormente la mezcla agua–nanofibras. El proceso se mantuvo hasta obtener una masa homogénea, verificando visualmente la uniformidad y consistencia de la mezcla. Entre coladas, la mezcladora se limpió completamente para evitar contaminación entre mezclas con diferente concentración o proporción de NFC.

3.5.3 Moldeo de probetas

El moldeo se realizó inmediatamente después del mezclado, utilizando moldes cilíndricos metálicos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, previamente limpiados y lubricado. Cada molde fue llenado en tres capas de igual volumen, compactando mediante un vibrador eléctrico de laboratorio, conforme a los procedimientos indicados en la NCh1017:2009. Tras el vibrado, las probetas se nivelaron, identificaron y codificaron según el tipo de mezcla y concentración de NFC (por ejemplo, M-A5050-0.05). Posteriormente, se cubrieron con lámina plástica durante 48 horas a temperatura ambiente antes del desmolde.

3.5.4 Curado y almacenamiento

Una vez desmoldadas, las probetas se trasladaron a la cámara húmeda del Laboratorio de Materiales UdeC, manteniendo condiciones de 20 ± 2 °C y humedad relativa superior al 95 %, conforme a la NCh170:2016. El período de curado se mantuvo hasta las edades de ensayo definidas (7, 14, 28, 56 y 90 días). Las probetas se almacenaron sobre repisas con parillas de madera, asegurando la libre circulación de aire y vapor de agua. Para los ensayos de absorción capilar, las probetas se retiraron al cumplir 28 días de curado y se acondicionaron según el protocolo de cada ensayo.

3.5.5 Ejecución de los ensayos

La ejecución de los ensayos se realizó de acuerdo con un orden cronológico establecido, garantizando la consistencia en la obtención de los resultados para todas las mezclas elaboradas. En primer lugar, se efectuó el ensayo de consistencia mediante el cono de Abrams (NCh1019:2009), aplicado inmediatamente después del mezclado y antes del moldeo de las probetas. Este procedimiento permitió determinar la diferencia de altura o asentamiento entre el molde y la mezcla, siendo un indicador de la trabajabilidad del hormigón fresco.

Posteriormente, se realizó el ensayo de compresión uniaxial (NCh1037:2009), el cual permitió evaluar la resistencia mecánica del hormigón a diferentes edades de curado. Para cada mezcla se ensayaron

dos especímenes por edad, registrando los valores máximos de carga aplicados y calculando el promedio conforme a la norma indicada.

A continuación, se llevó a cabo el ensayo de pérdida por ignición (LOI), con el propósito de estimar el grado de hidratación del cemento. Para este ensayo se seleccionó la probeta con mayor resistencia a compresión de cada mezcla, a partir de la cual se extrajo una muestra de polvo de hormigón utilizada para determinar el contenido volátil, siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 3.4.3.

Para finalizar este plan experimental, se desarrolló el ensayo de absorción capilar, destinado a evaluar la capacidad de absorción y permeabilidad del hormigón. En este caso, se emplearon dos especímenes por mezcla, los cuales fueron cortados transversalmente a la mitad para obtener discos de $15 \text{ cm} \pm 5 \text{ mm}$ de espesor. Cada mitad fue sellada lateralmente con parafina, dejando una cara expuesta al agua para permitir el ingreso unidireccional del líquido, de acuerdo con el procedimiento descrito en la Sección 3.4.4.

De esta manera, la secuencia de ensayos permitió obtener una caracterización completa del comportamiento del material tanto en estado fresco como endurecido, asegurando la comparabilidad de los resultados entre las diferentes combinaciones de nanofibras de celulosa evaluadas.

3.6. Conclusiones

En este capítulo se presentó el plan experimental desarrollado para evaluar la influencia de las nanofibras de celulosa (NFC) en el comportamiento mecánico y de durabilidad del hormigón.

Se describieron los materiales utilizados, el diseño de mezclas, los métodos de ensayo aplicados y el procedimiento experimental seguido en el Laboratorio de Hormigones de la Universidad de Concepción.

El programa experimental contempló la confección de mezclas con diferentes proporciones morfológicas (TG-TP) y concentraciones de adición (0,05 % y 0,1 %), manteniendo una relación agua/cemento constante de 0,50. Las mezclas fueron evaluadas mediante ensayos de trabajabilidad

(cono de Abrams), resistencia a la compresión, pérdida por ignición (LOI) y absorción capilar, siguiendo los procedimientos normativos establecidos.

Las etapas de mezclado, moldeo, curado y ensayo se ejecutaron bajo condiciones controladas, garantizando la repetibilidad y trazabilidad de los resultados. Se implementó un sistema de registro y codificación que permitió mantener el control de cada muestra durante todo el proceso experimental.

Finalmente, se establecieron las bases para el tratamiento y análisis de resultados, los cuales se presentan en el siguiente capítulo. Allí se exponen las comparaciones cuantitativas entre las mezclas con NFC y la mezcla patrón, con el objetivo de determinar el efecto del aditivo sobre el curado interno, la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Introducción

En el presente capítulo se presentan y analizan los resultados experimentales obtenidos a partir del programa de ensayos descrito en el Capítulo 3, con el propósito de evaluar el efecto de la incorporación de nanofibras de celulosa (NFC) recicladas sobre las propiedades del hormigón. Los resultados se organizan de manera secuencial, comenzando con la caracterización de los materiales utilizados (particularmente los áridos) y continuando con los ensayos de trabajabilidad, resistencia a la compresión, pérdida por ignición (LOI) y absorción capilar.

El análisis de cada ensayo combina un enfoque experimental y teórico–interpretativo, integrando la comparación entre mezclas con NFC y la mezcla patrón, junto con la discusión técnica basada en literatura revisada, con el fin de comprender el comportamiento del hormigón en términos de curado interno, resistencia y durabilidad.

4.2. Resultados áridos

4.2.1 Densidad y absorción de los áridos

Los ensayos de caracterización física de los áridos se realizaron conforme a las normas NCh1116:2018 (Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente), NCh1117:2010 (Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades reales y neta y de la absorción de agua de las gravas), NCh 1239:2009 (Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades reales y neta y de la absorción de agua de las arenas), con el propósito de verificar la calidad del material empleado en la confección de las mezclas. Los resultados obtenidos para las dos campañas de ensayo 16 de abril y 26 de junio de 2025 se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Resultados densidad y absorción de áridos utilizados

Propiedad	Arena (16-04-2025)	Arena (26-06-2025)	Grava (16-04-2025)	Grava (26-06-2025)
Densidad real árido saturado seco (kg/m ³)	2715,1	2722,2	2728,1	2736,6
Densidad real árido seco (kg/m ³)	2663,8	2662,7	2680,2	2678,6
Densidad neta (kg/m ³)	2808,8	2831,1	2815,1	2843,6
Absorción de agua (%)	1,9	2,2	1,8	2,2
Módulo de finura	2.75	2.74	9.96	9.97

Los resultados de los ensayos demuestran una alta uniformidad en el suministro de áridos, con una variación inferior al 1% en las densidades reales, lo que es indicativo de la calidad del material. Respecto a la absorción de agua, el árido fino (arena) cumple con el límite máximo de 3,0% de la NCh163:2024 (registrando valores entre 1,9% y 2,2%). Sin embargo, el árido grueso (grava) (2,2%) se encuentra ligeramente por sobre el límite de 2,0% de la norma. Finalmente, el Módulo de Finura del árido fino (2,75 y 2,74) cumple con el rango de 2,15 a 3,45 y presenta una pequeña variación, confirmando la aptitud general de los áridos para la fabricación de hormigón.

4.2.2 Análisis granulométrico

La distribución granulométrica de los áridos se determinó mediante el procedimiento de tamizado mecánico, aplicado conforme a lo establecido en la NCh165:2009 Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría. Durante el análisis granulométrico se registró el porcentaje retenido en cada tamiz y se construyó la correspondiente curva de distribución.

Posteriormente, los resultados obtenidos fueron contrastados con los límites granulométricos definidos por la propia NCh165:2009, verificándose que tanto la fracción fina (arena) como la fracción gruesa (grava) se encuentran dentro de los rangos característicos para granulometría media, lo cual confirma su idoneidad para la elaboración de hormigones en condiciones de laboratorio.

Las Figuras que presentan las curvas granulométricas obtenidas para los ensayos del 16 de abril y 26 de junio de 2025, se muestran en el Anexo 4.1 diferenciando los materiales finos y gruesos.

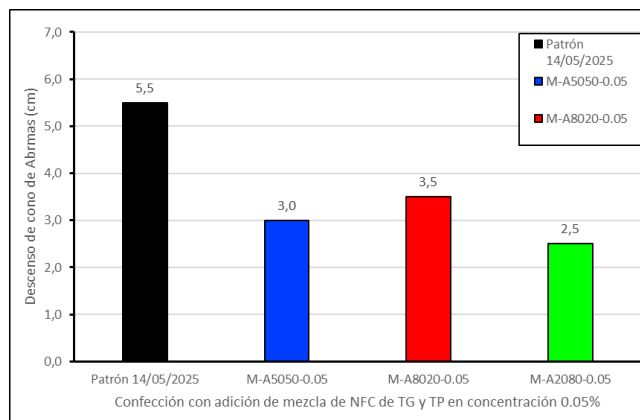
En conjunto, los resultados de densidad, absorción y granulometría confirman que los áridos utilizados cumplen con las especificaciones de la normativa nacional y proporcionan una base confiable para la evaluación de las mezclas de hormigón modificadas con nanofibras de celulosa, cuyos resultados se presentan en los apartados siguientes.

4.3. Ensayo de trabajabilidad – Cono de Abrams (NCh1019:2009)

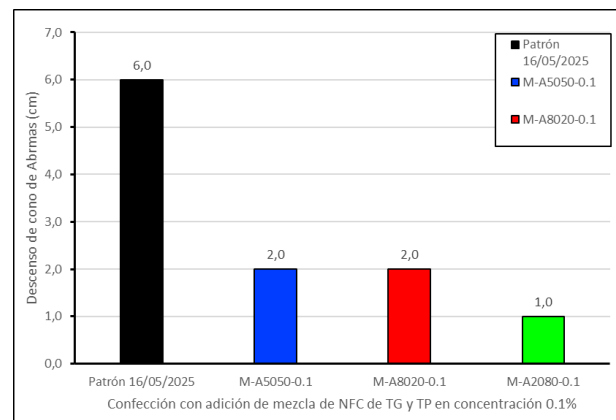
El ensayo de trabajabilidad se realizó conforme a la NCh1019: 2009, utilizando el cono de Abrams para determinar el descenso (asentamiento) de las mezclas elaboradas con y sin adición de nanofibras de celulosa (NFC).

El objetivo fue analizar la influencia del tipo y concentración de NFC sobre la consistencia del hormigón fresco, considerando las distintas combinaciones de fibras TG (tamaño grande) y TP (tamaño pequeño).

Los resultados se representaron en gráficos de barras comparativos que permiten visualizar la reducción progresiva del asentamiento en función de la cantidad y tipo de NFC incorporada.



**Figura 4.1 Resultados ensayo de trabajabilidad
14/05/2025**



**Figura 4.2 Resultados ensayo de trabajabilidad
16/05/2025**

La Figura 4.1 y la Figura 4.2 comparan el efecto de la concentración de NFC en la fluidez del hormigón. Tal como se aprecia, las mezclas con 0,05% de adición presentan una reducción moderada del asentamiento en comparación con el patrón, mientras que las mezclas con 0,1% muestran

disminuciones mucho más pronunciadas. Esto confirma que a mayor concentración de NFC, menor fluidez, ya que la fibra retiene parte del agua libre y aumenta la cohesión interna de la pasta.

Por otro lado, al analizar las mezclas dentro de cada concentración, se observa que la proporción de fibra larga y corta también influye en el comportamiento reológico. En la Figura 4.1 correspondiente al 0,05%, la barra roja (mezcla con mayor proporción de fibra larga, TG80-TP20) presenta un descenso mayor que la barra verde (mezcla con fibra corta, TG20-TP80). Lo mismo ocurre en las mezclas al 0,1%. Esto refuerza que la fibra larga reduce menos la fluidez que la fibra corta.

En conjunto, La Figura 4.1 y la Figura 4.2 muestran que tanto la concentración del aditivo como la morfología de la fibra determinan la trabajabilidad final. Las dosis mayores (0,1%) y las fibras más cortas son las que generan las reducciones de fluidez más significativas, mientras que las mezclas con mayor proporción de fibra larga mantienen un comportamiento más favorable dentro de cada nivel de adición.

La Figura 4.3 muestra que el comportamiento de mezclas con NFC de 0,05% es consistente al repetir el experimento en una nueva confección. Se advierte que las magnitudes de pérdida de fluidez al repetir el experimento el 16/06/2025 son casi idénticas al del experimento inicial realizado el 14/05/2025.

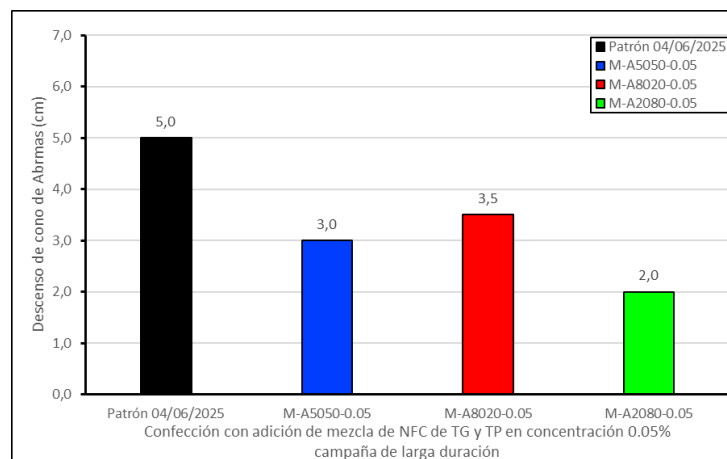


Figura 4.3 Resultados ensayo de trabajabilidad, ensayo de larga duración 04/06/2025

La Figura 4.4 evalúa la influencia de la concentración del aditivo compuesto TG50-TP50 en el asentamiento del hormigón. Los resultados muestran un comportamiento consistente con los análisis

previos. Al aumentar la dosificación desde 0,05% a 0,1%, la trabajabilidad disminuye, pasando de 2,0 cm a 1,0 cm de asentamiento. Esto confirma que el aditivo en mayor proporción incrementa la cohesión interna y reduce la movilidad de la mezcla.

En conjunto, se observa que la dosificación menor (0,05%) ofrece un desempeño más favorable, ya que conserva mayor fluidez respecto del porcentaje superior. Así, el aditivo 50-50 mantiene la misma tendencia que el resto de las NFC evaluadas, mostrando mejores resultados reológicos cuando se utiliza en concentraciones reducidas.

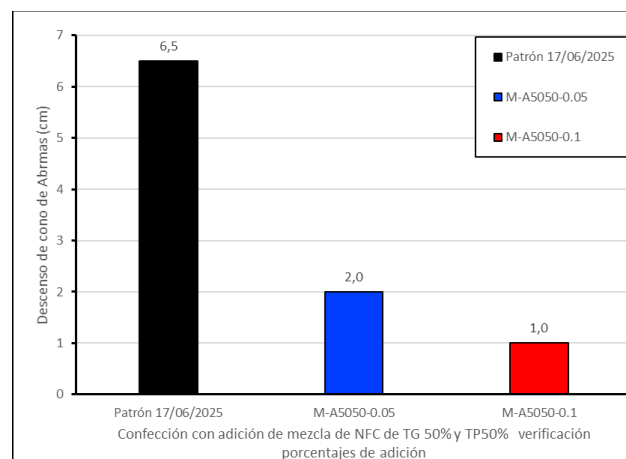


Figura 4.4 Resultados ensayo de trabajabilidad 17/06/2025, influencia de la proporción 50-50

A continuación, La Figuras 4.5 y la Figura 4.6 presenta el comportamiento de trabajabilidad de la mezcla TG 50% –TP 50% al 0,05% durante ambas campañas de durabilidad.

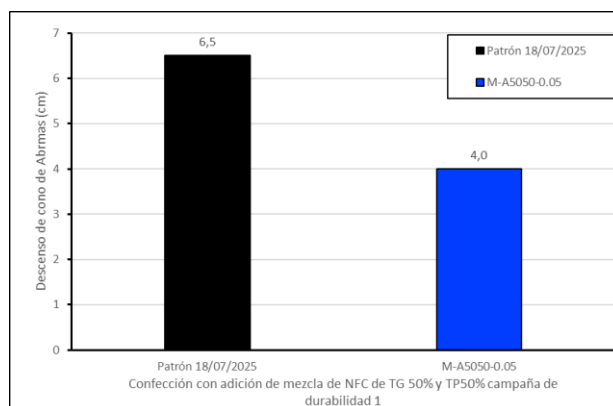


Figura 4.5 Resultados ensayo de trabajabilidad 18/07/2025

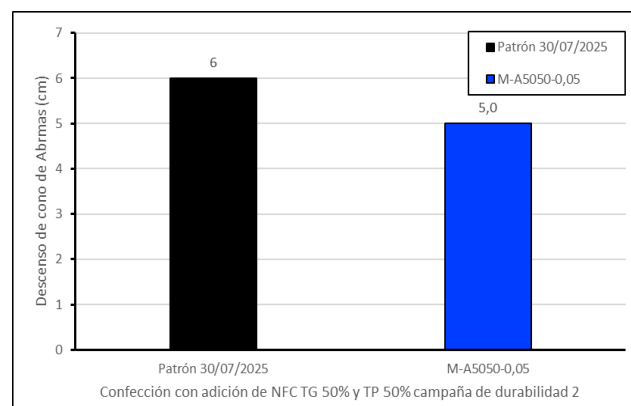


Figura 4.6 Resultados ensayo de trabajabilidad 30/07/2025

En ambos casos, la incorporación del aditivo reduce el asentamiento respecto del patrón, manteniendo la tendencia general observada en los análisis previos. Sin embargo, se aprecia que en la primera campaña la mezcla alcanzó un asentamiento de 4,0 cm, mientras que en la segunda alcanzó 5,0 cm, evidenciando una mayor fluidez en la confección más reciente.

Esta diferencia puede atribuirse a variaciones propias de los materiales de partida, especialmente en las condiciones de humedad y absorción de los áridos finos, ya que se trabajó bajo los mismos supuestos utilizados en ensayos previos. Pequeñas diferencias en el estado superficial de la arena pueden modificar la disponibilidad de agua efectiva en la mezcla, generando variaciones en la consistencia final del hormigón fresco. Aun así, ambas confecciones muestran que la mezcla 50–50 mantiene un desempeño estable y coherente con la tendencia general de reducción de fluidez asociada al uso de NFC.

Los resultados muestran de forma consistente que la incorporación de NFC reduce el asentamiento respecto de la mezcla patrón. En las primeras confecciones (14-05-2025 y 16-05-2025), la disminución oscila entre –36% y –83%, con la mayor pérdida de trabajabilidad en la mezcla 20%TG – 80%TP y en la dosificación más alta (0,1%: –85% el 17-06-2025). Esto sugiere que mayor proporción de TP (fibra pequeña) y mayor contenido de NFC incrementan la demanda de agua/viscosidad por su alta capacidad de absorción.

En la verificación de larga duración (04-06), las reducciones se mantienen relevantes (–30% a –60%), con el mínimo asentamiento nuevamente en 20%TG–80%TP (2,0 cm; –60%). Para la combinación 50–50 a 0,05%, la trabajabilidad varía según confección: –69% (17-06-2025), –33% (18-07-2025) y –17% (30-07-2025). Esta dispersión es compatible con pequeñas variaciones operacionales (humedad superficial de áridos, corrección de agua efectiva, temperatura ambiente) y no altera la tendencia global, la cual es: a 0,05% se conserva una consistencia utilizable, mientras que a 0,1% la mezcla se vuelve mucho más rígida.

En síntesis:

- Efecto de la morfología: Mayor TP, mayor reducción de descenso de la mezcla.
- Efecto de la dosificación: El porcentaje de adición de 0,1% genera mezclas sin fluidez (–85%), recomendando plastificante o ajuste a/c si se quisiera obtener una mayor trabajabilidad.

- Opción de equilibrio: 50–50 a 0,05 % ofrece el mejor comportamiento entre incorporación de NFC y trabajabilidad (reducciones entre –17 % y –69 % según confección), alineado con el objetivo de curado interno sin comprometer el moldeo.

4.4. Ensayo de resistencia a la compresión (NCh1037:2009)

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó conforme a la NCh1037:2009, utilizando probetas cilíndricas de 15 × 30 cm ensayadas a edades de 7, 14, 28, 56 y 90 días, dependiendo de la serie experimental. El objetivo fue evaluar la influencia del tipo y proporción de nanofibras de celulosa (NFC) sobre el desarrollo de la resistencia mecánica del hormigón, comparando los resultados con la mezcla patrón sin adición.

Las mezclas evaluadas consideraron distintas combinaciones entre fibras TG (tamaño grande) y TP (tamaño pequeño), con dos concentraciones en peso respecto al cemento (0,05 % y 0,1 %).

A continuación, se presentan los resultados de los ensayos de compresión uniaxial, los cuales se ven representados en gráficos de barra.

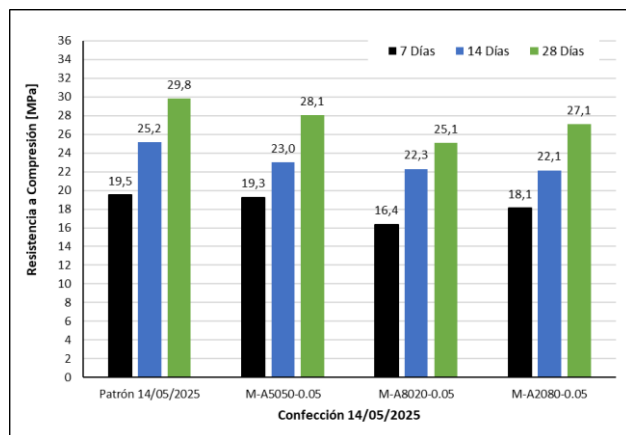


Figura 4.7 Resultados resistencia a la compresión, confección 14/05/2025

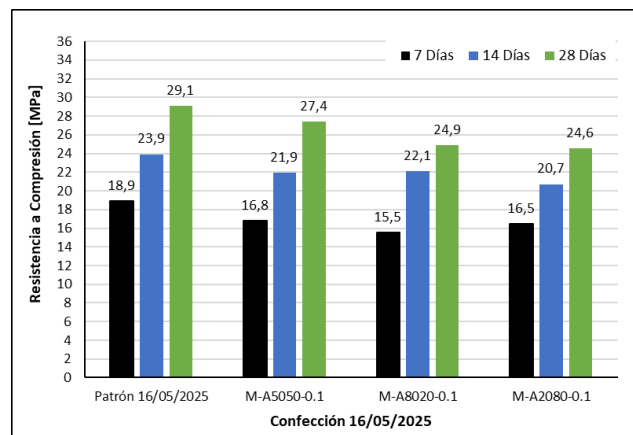


Figura 4.8 Resultados resistencia a la compresión, confección 16/05/2025

La Figura 4.7 y la Figura 4.8 muestran que la resistencia a compresión disminuye al incorporar NFC, siendo el efecto más notable cuando aumenta la dosificación desde 0,05% a 0,1%. Las mezclas con 0,05% presentan reducciones moderadas y una evolución estable hacia los 28 días, mientras que al

0,1% las pérdidas son mayores debido al incremento de porosidad y a la mayor interferencia de las fibras en la compactación.

La Figura 4.9 muestra los resultados de la campaña de larga duración, se muestra el comportamiento a compresión a 28, 56 y 90 días para las mezclas con 0,05% de NFC, seleccionadas por su mejor desempeño inicial. Se observa que, aunque a 28 días las mezclas con nanofibras presentan resistencias levemente inferiores al patrón, a partir de los 56 días comienzan a igualar o superar sus valores, evidenciando que el efecto de las NFC se vuelve favorable en edades avanzadas. Este comportamiento se atribuye a que las nanofibras retienen y liberan agua de manera gradual, favoreciendo una hidratación más prolongada y eficiente, lo que permite el desarrollo de una microestructura más densa y continua con el paso del tiempo. La tendencia ascendente hacia los 90 días en todas las mezclas con NFC confirma que el aditivo contribuye a un mejoramiento tardío de la matriz cementicia, compensando las reducciones observadas en edades tempranas.

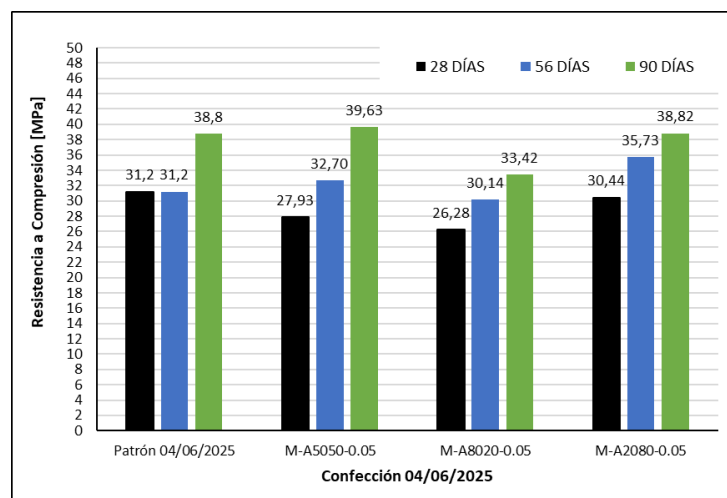


Figura 4.9 Resistencia a la compresión confección 04/06/2025, impacto en larga duración

Del mismo modo, a continuación, la Figura 4.10 compara el desempeño a compresión de la mezcla TG50–TP50 utilizando dos porcentajes de adición (0,05% y 0,01%) con el objetivo de determinar cuál concentración resulta más eficiente. Se observa que, si bien ambos porcentajes presentan valores cercanos al patrón en edades tempranas, la dosificación 0,05% muestra un mejor desarrollo resistente a 28 días, alcanzando 32,0 MPa frente a los 30,2 MPa obtenidos con 0,01%. Esta diferencia sugiere que una dosis ligeramente mayor permite aprovechar mejor el efecto de las nanofibras.

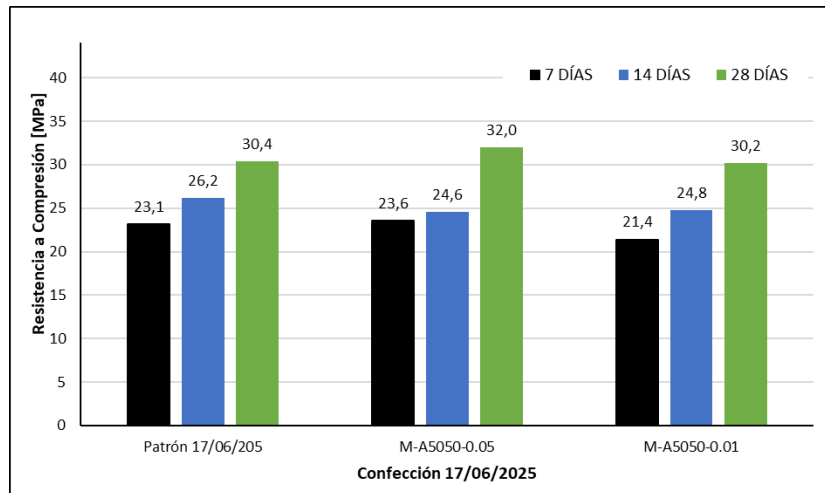


Figura 4.10 Resistencia a la compresión confección 17/06/2025, impacto de la proporción 50-50

Por último, la Figura 4.11 y la Figura 4.12 comparan los resultados de compresión a 7 y 28 días para las dos campañas de durabilidad utilizando la mezcla TG50–TP50 al 0,05%. En ambos casos, la mezcla con nanofibras iguala o supera al patrón a 7 días y muestra un desempeño favorable a 28 días. En la segunda campaña, el patrón presenta una resistencia menor debido a variaciones propias del estado de humedad y absorción de los áridos, lo que afectó la disponibilidad de agua efectiva en la mezcla. Aun así, incluso bajo estas condiciones menos favorables, la mezcla con NFC mantuvo un mejor desarrollo resistente, lo que confirma que el aditivo sigue ejerciendo un efecto positivo sobre la hidratación y la microestructura del hormigón, especialmente al consolidarse la resistencia a 28 días.

En conjunto, los datos muestran que la resistencia aumenta progresivamente con la edad en todas las mezclas, destacando que las que incorporan NFC logran niveles de compresión iguales o superiores al patrón a partir de los 28 días.

La mezcla M-A5050-0.05 presentó el comportamiento más regular y sostenido en comparación con la mezcla sin aditivo, especialmente en los ensayos de larga duración (56 y 90 días).

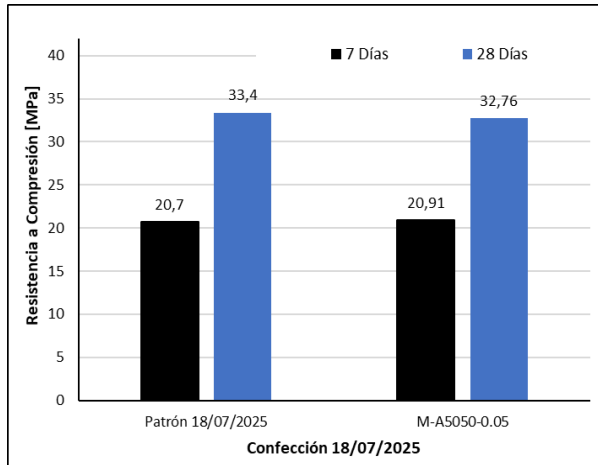


Figura 4.11 Resistencia a la compresión confección 18/07/2025, impacto mezcla M-A5050-0.05

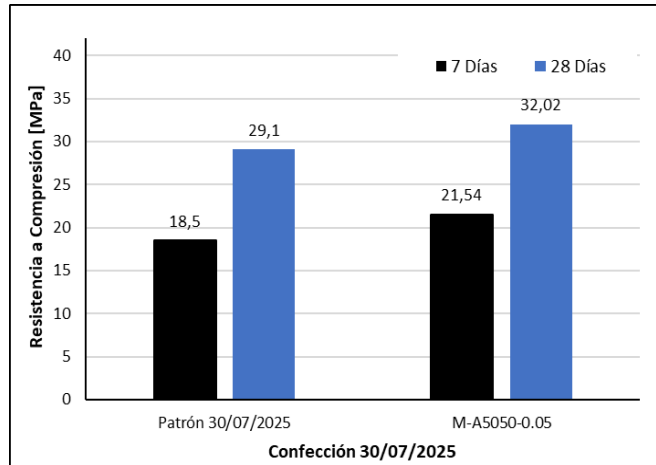


Figura 4.12 Resistencia a la compresión confección 30/07/2025, impacto mezcla M-A5050-0.05

Los resultados experimentales permiten establecer que la incorporación de nanofibras de celulosa (NFC) recicladas influye directamente en el comportamiento mecánico e hídrico del hormigón, mostrando efectos dependientes de la dosificación, la morfología de la fibra y el tiempo de curado. En términos generales, se observó que las dosis bajas (0,05%) presentan un desempeño más favorable, especialmente en la combinación TG50% – TP50%, donde se logra un equilibrio óptimo entre trabajabilidad, desarrollo resistente y eficiencia microestructural.

Durante las edades tempranas (7 y 14 días), las diferencias entre las mezclas con NFC y la mezcla patrón fueron moderadas. Esto se explica porque, en esta etapa, las nanofibras tienden a retener agua libre debido a su elevada área superficial, lo que disminuye temporalmente la disponibilidad inmediata de agua para la hidratación inicial. Este fenómeno atenúa el desarrollo de la resistencia temprana, pero no afecta la progresión posterior del fraguado. En la confección del 14-05-2025, por ejemplo, la mezcla TG50% – TP50% (0,05%) alcanzó 19,3 MPa y 23,0 MPa a 7 y 14 días, valores cercanos a los obtenidos por el control (19,5 MPa y 25,2 MPa). Tal comportamiento es coherente con lo documentado en la literatura, donde se indica que las NFC expresan su efecto beneficioso principalmente en edades avanzadas debido al proceso de curado interno.

A los 28 días, las diferencias entre mezclas continúan siendo reducidas, observándose variaciones menores entre las distintas proporciones morfológicas. En la confección 14-05-2025 (0,05%), la mezcla 50–50 registró 28,1 MPa, ligeramente inferior al patrón (29,8 MPa), mientras que las proporciones 80–20 y 20–80 alcanzaron 25,1 MPa y 27,1 MPa, respectivamente. Estos valores

demuestran que las NFC no generan pérdidas significativas de resistencia estructural y permiten mantener parámetros mecánicos dentro de rangos adecuados para un hormigón convencional.

En la confección del 16-05-2025, con 0,1% de NFC, se observó el mismo patrón. La mezcla 50–50 alcanzó 27,4 MPa frente a 29,1 MPa del patrón, mostrando reducciones coherentes con la disminución de trabajabilidad inicial. Dosis mayores aumentan la cohesión interna, dificultan la compactación y generan micro-heterogeneidades, lo que explica la ligera disminución de resistencia. Aun así, las mezclas con NFC mantuvieron niveles mecánicos adecuados, confirmando que la presencia de fibras no compromete la integridad estructural del material, incluso con menor fluidez inicial.

El comportamiento más relevante se observó en los ensayos de larga duración (04-06-2025), que permitieron evaluar las resistencias a 56 y 90 días. En esta etapa, el aporte de las NFC se vuelve evidente: la mezcla 50–50 (0,05%) alcanzó 32,7 MPa a 56 días y 39,6 MPa a 90 días, superando al patrón (31,2 MPa y 38,8 MPa). Esto representa incrementos aproximados de +4,8% a 56 días y +2,1% a 90 días. La mezcla 20–80 (0,05%) también mostró mejoras relevantes, alcanzando 35,73 MPa y 38,82 MPa, lo que implica aumentos de +14,5% a 56 días y +1% a 90 días respecto al control. Estas mejoras se explican por el fenómeno de curado interno. las NFC retienen agua en sus estructuras fibrilares y la liberan progresivamente durante el proceso de hidratación secundaria, favoreciendo la formación de una matriz cementicia más densa, reduciendo la microfisuración por retracción y mejorando la continuidad del gel C–S–H.

En la confección del 17-06-2025 se compararon directamente ambas dosis (0,05% y 0,1%) en la misma proporción 50–50. A 28 días, la mezcla con 0,05% alcanzó 32,0 MPa, superando al patrón (30,4 MPa) y a la dosificación de 0,1% (30,2 MPa). Esto confirma que el efecto beneficioso de las NFC no aumenta proporcionalmente con la concentración, sino que existe un nivel óptimo cercano al 0,05%, donde se maximiza la hidratación interna sin afectar negativamente la trabajabilidad ni la compactación.

Las confecciones del 18-07-2025 y 30-07-2025 reforzaron esta misma tendencia. En ambos casos, la mezcla 50–50 (0,05%) mantuvo o superó al patrón a 28 días. Incluso en la campaña donde el patrón mostró menor resistencia (debido a variaciones naturales en el estado superficial y humedad de los áridos) la mezcla con NFC logró valores superiores, evidenciando la capacidad del aditivo para

estabilizar la hidratación y mejorar la formación de la microestructura, aún bajo condiciones menos favorables.

En términos globales, las mezclas con NFC presentaron incrementos del orden de 5–10% respecto al patrón a 28 días, mientras que en edades avanzadas (56–90 días) la mezcla TG50% – TP50% (0,05%) mostró mejoras cercanas al 5% a 56 días y 2% a 90 días. La mezcla 20–80 (0,05%) alcanzó un incremento máximo del 14,5% a 56 días, demostrando que, si bien el efecto varía entre proporciones morfológicas, se mantiene consistentemente positivo en todas las combinaciones evaluadas. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Hisseine *et al.* (2019), quien destaca mejoras mecánicas en hormigones con nanocelulosa debido a la retención y liberación progresiva de humedad, optimizando la hidratación secundaria del cemento.

En síntesis, los resultados experimentales demuestran de manera consistente que la incorporación de 0,05 % de nanofibras de celulosa recicladas en proporción TG50% – TP50 % mejora el comportamiento mecánico del hormigón. Para cada edad de curado se ensayaron dos especímenes por mezcla, observándose una adecuada repetibilidad de los resultados y una dispersión acotada entre valores, lo que respalda la confiabilidad de las tendencias identificadas. Se registraron incrementos mecánicos del orden de 5–10 % a 28 días y entre 2–14 % a edades mayores, lo que valida la hipótesis inicial de que las NFC actúan como un aditivo sustentable de curado interno, fortaleciendo la matriz cementicia, mejorando la hidratación tardía y contribuyendo al desarrollo de un hormigón más resistente y durable.

4.5. Ensayo de pérdida por ignición

El ensayo de pérdida por ignición (*Loss on Ignition*, LOI) se empleó para estimar el grado de hidratación del cemento en las mezclas de hormigón con y sin incorporación de nanofibras de celulosa (NFC). El procedimiento experimental se realizó según lo establecido en la Sección 3.4, utilizando material pulverizado extraído de las probetas con mayor resistencia a compresión, con el fin de correlacionar los niveles de hidratación con el desempeño mecánico del material.

El método consiste en determinar la pérdida de masa de la muestra tras ser sometida a calcinación a alta temperatura, lo que permite cuantificar la fracción asociada a productos hidratados del cemento

(principalmente C–S–H, portlandita y etringita). A partir del valor LOI se obtiene el grado de hidratación (DoH) mediante la relación matemática presentada en la Sección 3.4.1. Por este motivo, los gráficos presentados a continuación corresponden exclusivamente a los valores de DoH estimados para cada mezcla, ya que este parámetro refleja de manera directa el avance de la hidratación y permite comparar el efecto de la incorporación de nanofibras en el desarrollo microestructural del hormigón.

Los resultados obtenidos se presentan a continuación mediante gráficos, los cuales muestran la evolución del grado de hidratación en función de la edad de curado y el tipo de mezcla.

La Figura 4.13 presenta el grado de hidratación y la Figura 4.14 la variación porcentual respecto al patrón para las confecciones del 14/05 y 16/05. En La Figura 4.13 se muestran los valores de hidratación, donde todas las mezclas con NFC alcanzan niveles iguales o superiores al control en 7, 14 y 28 días. La Figura 4.14 complementa este comportamiento mostrando incrementos porcentuales significativos, principalmente en las dosificaciones del 0,05 %, las cuales presentan los mayores beneficios a edades avanzadas.

En conjunto, los resultados indican que la incorporación de nanofibras favorece el desarrollo de hidratación frente al patrón, especialmente en configuraciones 50–50 y 80–20. Esto respalda el efecto del curado interno generado por la retención y liberación progresiva de agua dentro de la matriz cementicia, lo que se hace más evidente con el aumento de la edad de curado.

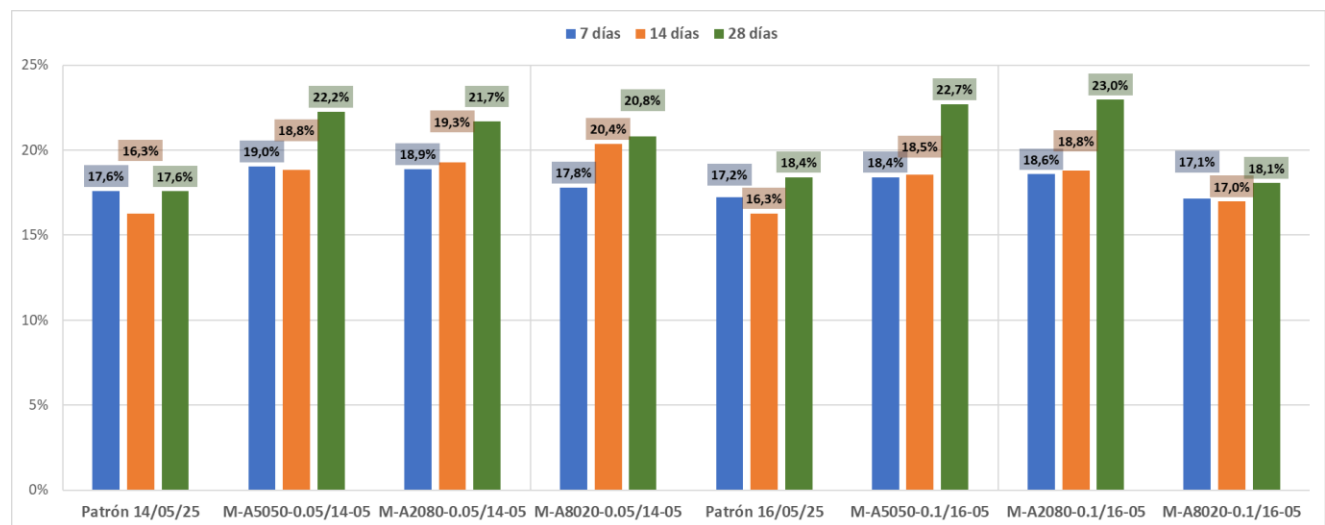


Figura 4.13 DOH confecciones 14/05/2025 y 16/05/2025

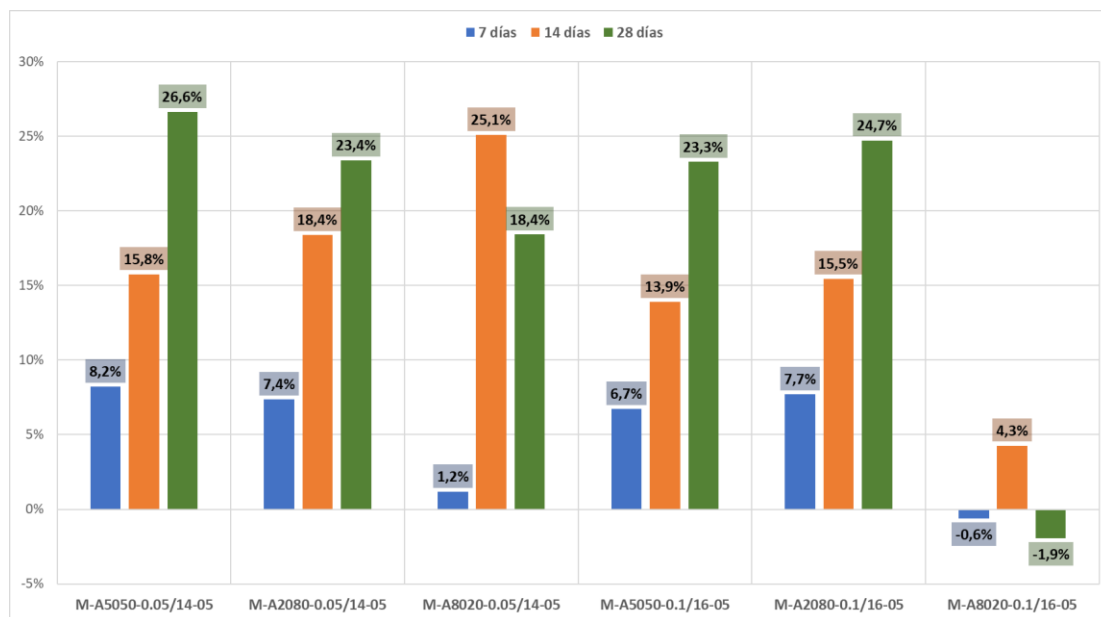


Figura 4.14 Variación porcentual del DoH con respecto al patrón, confecciones 14/05/2025 y 16/05/2025

A continuación, La Figura 4.15 presenta los resultados del DoH, mientras que la Figura 4.16 muestra la variación porcentual con respecto al patrón, de las confecciones correspondientes a la campaña de larga duración. En términos absolutos, todas las mezclas con NFC alcanzan valores similares o ligeramente superiores al patrón. A los 28 días, las mezclas M-A8020-0.05 y M-A2080-0.05 presentan DoH mayores al control, mientras que la mezcla M-A5050-0.05 no registra valor debido a la falla del ensayo, aunque sí dispone de resultados para 56 y 90 días. A los 56 días, la mezcla 50-50 exhibe el mayor nivel de hidratación, seguida de 80-20 y 20-80, mientras que a los 90 días todas las mezclas convergen en torno a 20–21 %, con diferencias mínimas respecto del patrón.

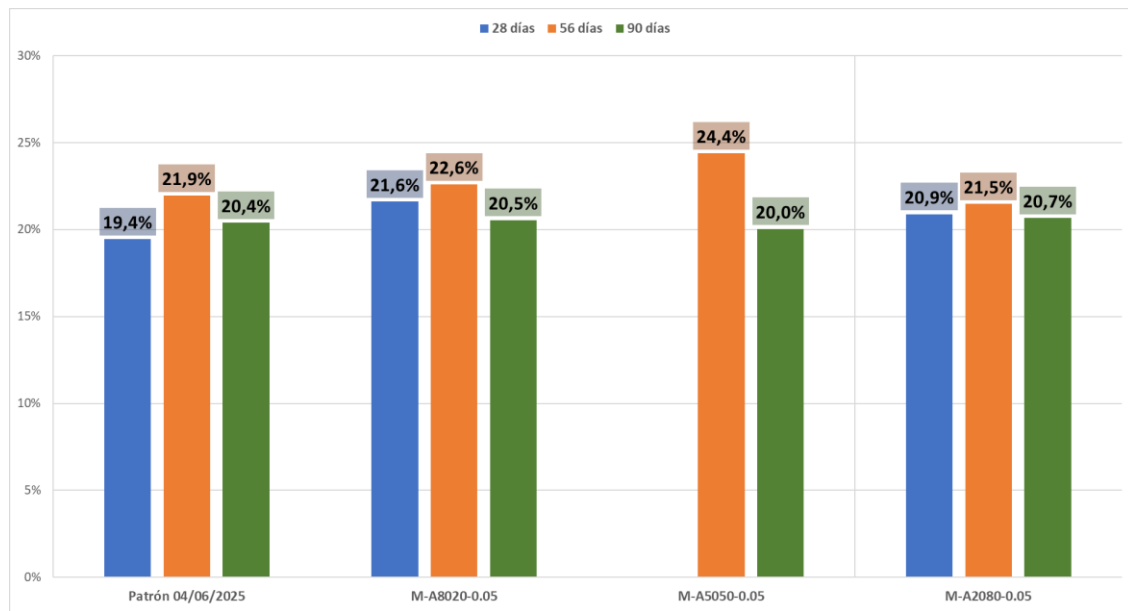


Figura 4.15 DoH confección 04/06/2025 larga duración

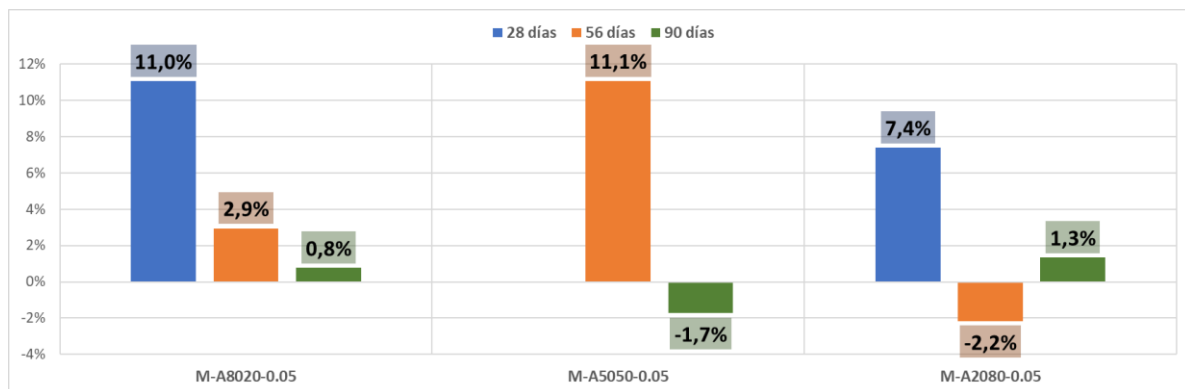


Figura 4.16 Variación porcentual del DoH con respecto al patrón, confección 04/06/2025 larga duración

Este comportamiento, se debe a que, en esta campaña, la humedad almacenada por las nanofibras habría sido aprovechada principalmente en la formación de productos de hidratación asociados a resistencia mecánica (principalmente gel C-S-H), lo que favorece el desarrollo estructural del hormigón sin traducirse necesariamente en aumentos significativos del DoH medido. En síntesis, los hormigones con NFC mantuvieron niveles de hidratación equivalentes o superiores al patrón, logrando un desempeño mecánico eficiente en largo plazo, especialmente en configuraciones 50-50 y 20-80.

Por consiguiente, con el fin de evaluar el comportamiento específico de la configuración 50-50 en dosificaciones 0,05 % y 0,1 %, se confeccionaron mezclas adicionales, las cuales se presentan a continuación. Los valores asociados al DoH se encuentran en la Figura 4.17, mientras que su variación porcentual se presenta en la Figura 4.18.

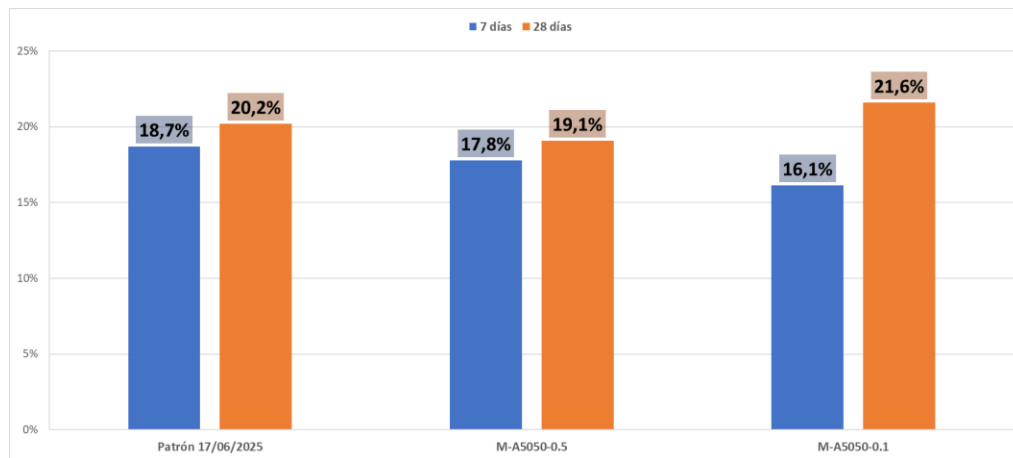


Figura 4.17 DoH confección 17/06/2025

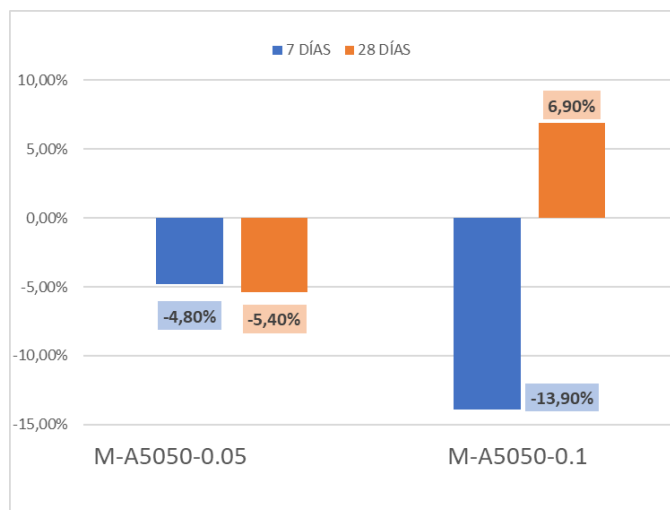


Figura 4.18 Variación porcentual del DoH con respecto al patrón, confección 17/06/2025

En este caso, los valores de DoH fueron menores que el patrón, especialmente en la mezcla M-A5050-0.05, lo que contrasta con su buen desempeño mecánico. En esta campaña de ensayos, el agua retenida por la nanofibra habría sido aprovechada principalmente en la formación de gel C-S-H orientado al desarrollo resistente, lo que favoreció la compresión sin necesariamente reflejarse en un incremento medible del DoH. Bajo este escenario, parte de la hidratación disponible se traduce más en

densificación estructural que en aumento del porcentaje global de hidratación detectado por calcinación.

A continuación, con la misma disposición de los gráficos anteriores, se presentan los resultados del ensayo LOI de las probetas designadas a las campañas de durabilidad 1 y 2. La Figura 4.19 y la Figura 4.21 presentan los valores de grado de hidratación, mientras que la Figura 4.20 y la Figura 4.22 muestran la variación porcentual respecto al patrón de acuerdo con sus campañas de durabilidad respectivas.

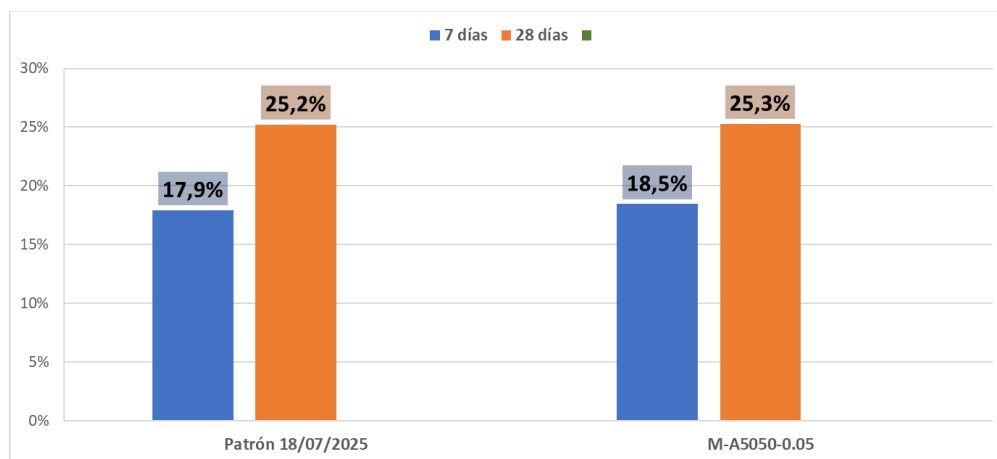


Figura 4.19 DoH confección 18/07/2025 durabilidad 1

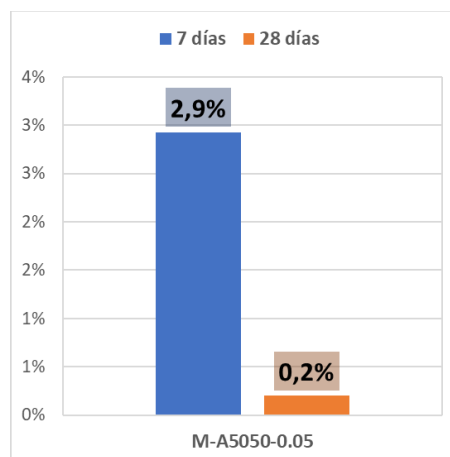


Figura 4.20 Variación porcentual del DoH con respecto al patrón, confección 18/07/2025 durabilidad 1

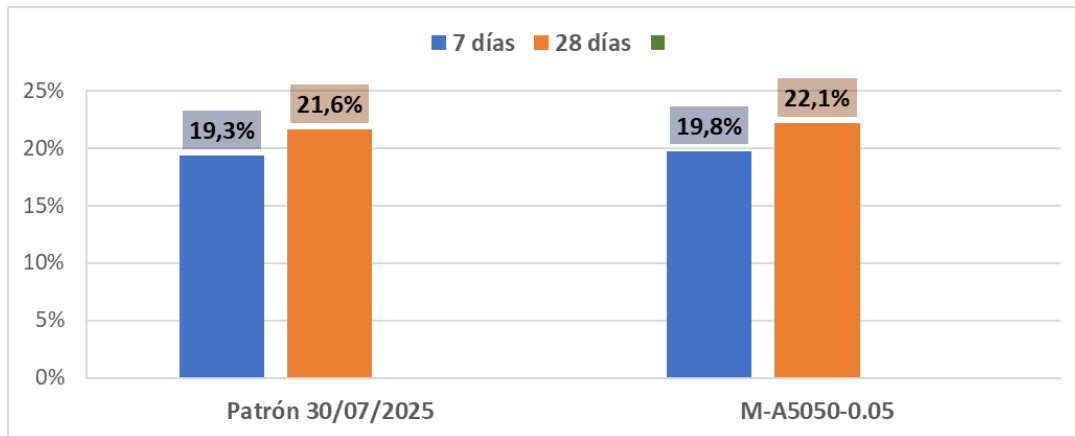


Figura 4.21 DoH confección 30/07/2025 durabilidad 2

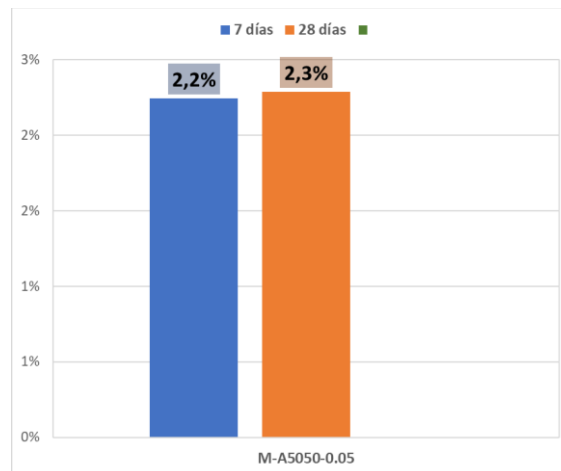


Figura 4.22 Variación porcentual del DoH con respecto al patrón, confección 30/07/2025 durabilidad 2

En ambos casos, las mezclas con nanofibra de celulosa muestran valores superiores al control, lo que evidencia que la presencia de NFC favoreció el progreso de hidratación del cemento. Este efecto se manifiesta con mayor claridad en edades tempranas, donde las mezclas modificadas presentan incrementos significativos en comparación con el patrón, siendo la tendencia en la mayoría de las probetas ensayadas.

El comportamiento observado puede atribuirse a la capacidad de la nanofibra para retener y liberar humedad de forma gradual, actuando como un agente de curado interno. Esto permitió mantener disponible agua para la reacción cementicia incluso después del fraguado inicial, generando mayor formación de gel C-S-H y, por ende, mayores valores de DoH en ambas campañas. En conclusión, los

resultados confirman que la inclusión de NFC contribuyó a una hidratación más activa y sostenida, validando su efecto en la mejora del desempeño del hormigón.

Los resultados del ensayo LOI corroboran el efecto positivo de las nanofibras de celulosa recicladas sobre el proceso de hidratación del cemento. En todas las campañas analizadas, se observó un aumento del porcentaje de pérdida por ignición en las mezclas con NFC, lo que se traduce en una mayor cantidad de productos de hidratación y, por tanto, un curado interno más eficiente.

El incremento más significativo se registró en las confecciones 14-05-2025 y 16-05-2025, donde las mezclas con NFC mostraron entre 20% y 26% de aumento en el DoH a 28 días respecto al patrón. Este comportamiento coincide con las observaciones realizadas por Hisseine *et al.* (2019), quienes reportan que la adición de nanocelulosa favorece la retención capilar de agua y su liberación controlada durante la hidratación, generando una microestructura más densa y continua.

En las series de larga duración (04-06-2025), aunque las diferencias en LOI se reducen con el tiempo, las mezclas con NFC mantuvieron un grado de hidratación levemente superior al control, evidenciando que las nanofibras permiten un curado más sostenido, incluso cuando el aporte externo de agua ya no es significativo. Esto sugiere que la acción del aditivo no se limita a las primeras etapas, sino que contribuye a la progresiva densificación de la matriz cementicia, lo que se traduce en la mayor resistencia a compresión observada en las mismas mezclas.

En síntesis, la pérdida por ignición demostró ser un indicador confiable del efecto de las NFC sobre la hidratación. Las mezclas con 0,05% de adición, especialmente la combinación TG–TP 50–50, presentaron los valores de DoH más altos, confirmando un mejor aprovechamiento del agua interna y validando el rol de las nanofibras como agentes de curado interno. Estos resultados complementan los ensayos mecánicos, reforzando la hipótesis de que la mejora observada en resistencia a compresión se asocia directamente con un mayor grado de hidratación y desarrollo microestructural del hormigón.

4.6. Ensayo de absorción capilar

El ensayo de absorción capilar permitió evaluar la capacidad del hormigón para absorber agua a través de su red porosa bajo condiciones de succión capilar, sin aplicación de presión externa. Este fenómeno

está directamente asociado con la permeabilidad y la durabilidad del material, ya que una menor tasa de absorción indica una microestructura más densa, menor conectividad capilar y, en consecuencia, una mayor resistencia al ingreso de agentes agresivos. El método se fundamenta en el modelo teórico de Hall (1989), quien estableció que la absorción acumulada $I(t)$ es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo ($\sqrt{t}$), lo que permite determinar la pendiente de este tramo lineal como la tasa de absorción o sorptividad (S), parámetro representativo de la eficiencia del transporte capilar interno.

En este estudio se aplicó la metodología ASTM C1585 para caracterizar el comportamiento hidráulico del hormigón con adición de nanofibras de celulosa (NFC), analizando exclusivamente los resultados correspondientes a la Campaña de Durabilidad 1 (18-07-2025), por ser la única que cumplió adecuadamente las condiciones de trabajabilidad y correcto control de humedad de los áridos. En esta campaña se evaluaron probetas patrón y probetas con adición de NFC TG 50% – TP 50% en concentración 0,05%, distinguiendo la absorción de las caras superior (SUP) e inferior (INF) de cada espécimen.

A continuación, La Figura 4.23 presenta la curva de absorción capilar para la mezcla con nanofibras TG50%–TP50% al 0,05%, comparando el comportamiento de la cara superior (SUP) y la cara inferior (INF) de la probeta. Se observa que la cara superior presenta valores de absorción mayores en todo el intervalo del ensayo, mientras que la cara inferior mantiene una absorción más baja y un crecimiento más gradual con el tiempo. Este comportamiento es coherente con la distribución interna habitual de los cilindros de hormigón, debido al proceso de llenado y vibrado, las partículas sólidas tienden a concentrarse en la zona inferior, generando una microestructura más densa y menos conectada, mientras que la parte superior presenta una mayor proporción de poros finos y aire ocluido.

Como resultado, la cara superior facilita en mayor medida la succión capilar inicial y sostenida, mientras que la inferior ofrece una resistencia hidráulica superior. La Figura 4.23 permite visualizar claramente cómo la orientación del espécimen influye en el transporte capilar y constituye la base para el cálculo de las tasas de sorptividad inicial y secundaria, que se presentan en los apartados siguientes junto con su interpretación.

Los gráficos restantes correspondientes a esta campaña, incluyendo las curvas de absorción capilar de la probeta patrón y de la segunda probeta TG50% – TP50% 0,05%, se presentan en el Anexo 4.2.

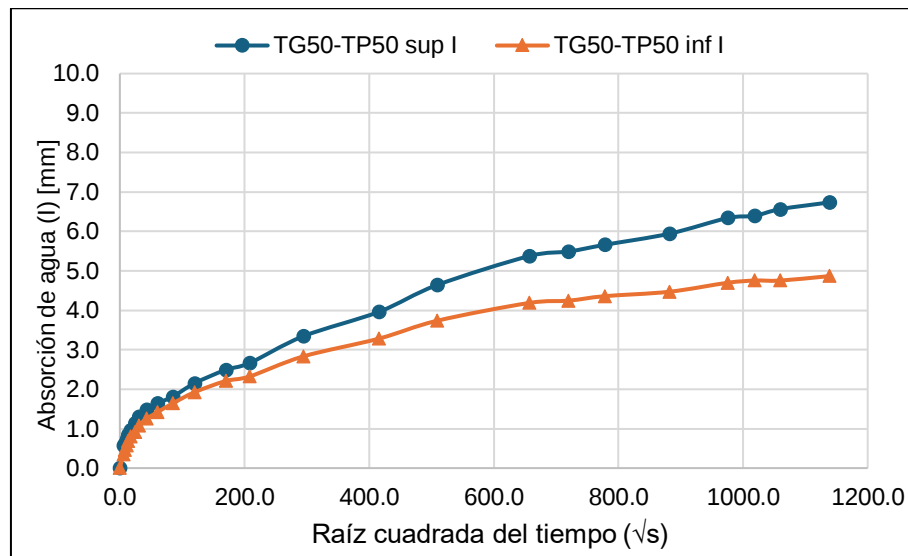


Figura 4.23 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFCTG50%-TP50% 0,05%, comparación parte inferior y superior

Con el fin de complementar el análisis individual por probeta, se elaboró un gráfico comparativo que integra las curvas de absorción capilar correspondientes a las caras superiores de las dos probetas TG50%-TP50% 0,05% y la probeta patrón, todas pertenecientes a la Campaña de Durabilidad 1.

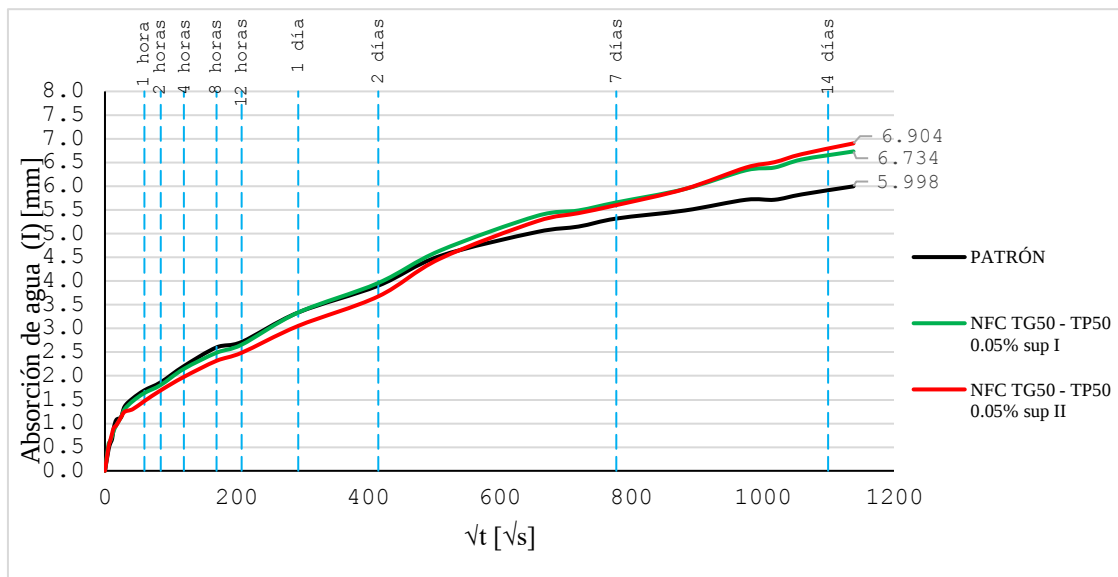


Figura 4.24 Comparación absorción capilar con respecto al patrón, parte superior

La Figura 4.24 muestra que, durante las primeras 24 horas del ensayo, ambas probetas con nanofibra presentan menores valores de absorción capilar que la probeta patrón, evidenciando una menor

velocidad de ingreso inicial de agua. Este comportamiento indica que la mezcla modificada posee una superficie más densa y una menor conectividad capilar inmediata, lo cual coincide con la presencia de una red porosa parcialmente obstruida por la acción de las nanofibras y con la mejora en la cohesión microestructural superficial.

Sin embargo, a partir del segundo día las curvas de las probetas con nanofibras superan levemente a la del patrón, evidenciando una absorción prolongada y sostenida. Este comportamiento se explica porque el hormigón patrón tiende a saturarse más rápidamente, mientras que las mezclas con NFC continúan absorbiendo agua de forma gradual debido a la capacidad de las nanofibras de retener y liberar humedad en su estructura fibrilar. Cabe señalar que esta absorción prolongada no implica necesariamente un aumento en la conectividad de poros ni una mayor difusión de agentes agresivos solubles, como cloruros, ya que se asocia principalmente al mecanismo de curado interno y a la acción absorbente de la nanofibra, no obstante, su efecto sobre la durabilidad a largo plazo debe interpretarse con cautela y evaluarse mediante ensayos específicos de transporte iónico.

Del mismo modo, la Figura 4.25 presenta el gráfico comparativo correspondiente a las caras inferiores (INF) de las probetas evaluadas en la Campaña de Durabilidad 1. Este gráfico integra la curva de la probeta patrón y las curvas de las dos probetas con mezcla TG50–TP50 0,05%, permitiendo observar cómo evoluciona la absorción capilar en la zona inferior de los especímenes, donde la compactación y densificación generada durante el colado tienden a ser mayores. Su análisis es relevante, ya que la cara inferior suele presentar una microestructura distinta a la superior, por lo que comparar su comportamiento con y sin nanofibras permite identificar el efecto real de la NFC sobre la porosidad conectada en esta región.

La Figura 4.25 muestra que, a lo largo de todo el ensayo, las probetas con nanofibras presentan una absorción capilar menor que la probeta patrón, lo que indica un comportamiento significativamente más resistente al ingreso de agua por succión. Desde las primeras horas, la mezcla TG50%–TP50% 0,05% exhibe valores inferiores de $I(t)$, lo que evidencia una menor conectividad capilar y una red porosa más refinada en la zona inferior del espécimen.

Este comportamiento se mantiene de manera consistente en todo el periodo evaluado, mientras la probeta patrón continúa absorbiendo agua a un ritmo mayor, las probetas con NFC muestran una

progresión más lenta y estable. Esto confirma que la adición de nanofibras contribuye a reducir la permeabilidad efectiva en la cara inferior, disminuyendo la capacidad de transporte capilar en esta región del cilindro.

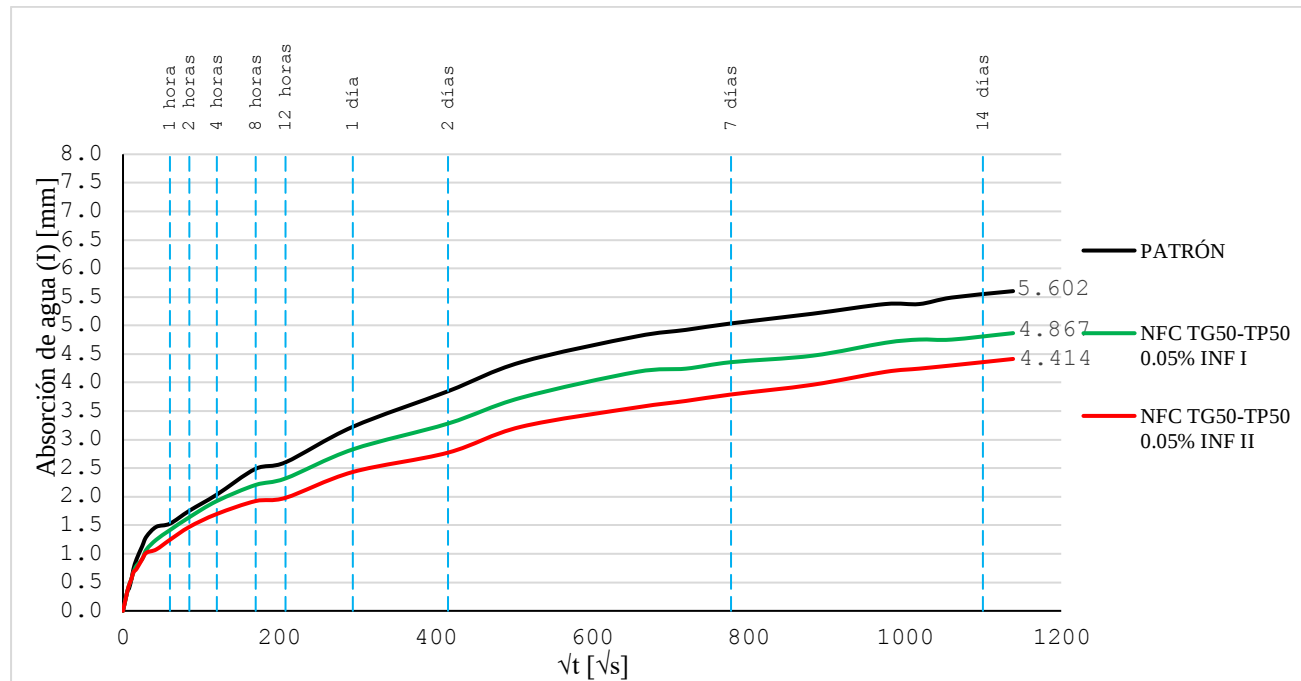


Figura 4.25 Comparación absorción capilar con respecto al patrón, parte inferior

A continuación, se presenta un gráfico integrador que reúne todas las curvas de absorción capilar obtenidas en la Campaña de Durabilidad 1, incluyendo las caras superiores (SUP) e inferiores (INF) de las dos probetas con mezcla TG50–TP50 0,05% y la probeta patrón.

La Figura 4.26, consolida todos ensayos de parte superior e inferior permite observar con claridad las diferencias sistemáticas entre la mezcla patrón y las probetas con nanofibras en ambas caras del cilindro. En primer lugar, se aprecia que las caras inferiores (INF) (tanto del patrón como de las mezclas con NFC) presentan valores de absorción menores que sus respectivas caras superiores, lo que confirma la influencia del proceso de llenado y vibrado en la densidad de esta región. Dentro de este comportamiento, las probetas con nanofibras exhiben consistentemente las menores absorciones en la cara inferior, lo que indica una microestructura más compacta y con menor conectividad capilar que la del hormigón de referencia.

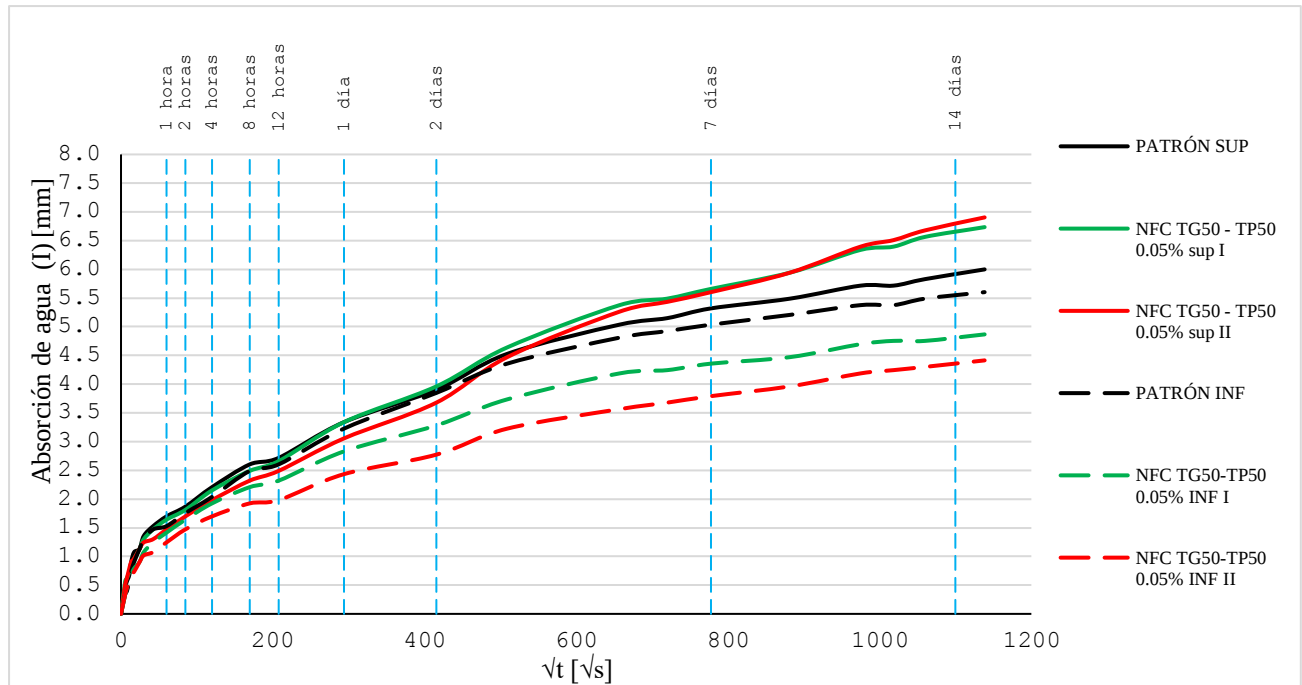


Figura 4.26 Comparación absorción capilar con respecto al patrón, parte inferior y superior

La sorptividad corresponde a la tasa con que el agua ingresa al hormigón por acción capilar y se expresa como la pendiente de la relación entre la absorción acumulada $I(t)$ y la raíz cuadrada del tiempo ($\sqrt{t}$). Este parámetro se divide en sorptividad inicial (S_i) y sorptividad secundaria (S_s), asociadas a dos etapas del mecanismo de succión definidas por la norma ASTM C1585.

La sorptividad inicial (S_i) se obtuvo utilizando la pendiente de los datos comprendidos entre 30 segundos y 8 horas, intervalo donde la norma establece que debe evaluarse la etapa de succión inicial del material. Este rango captura la velocidad a la cual el agua penetra en los poros más accesibles y conectados del hormigón.

La sorptividad secundaria (S_s) se determinó a partir de la pendiente del tramo comprendido entre el día 1 y el día 7 del ensayo, tal como lo indica la metodología normativa para caracterizar la absorción lenta o tardía. Esta fase representa el ingreso de agua en condiciones de saturación parcial, dominada por poros más finos y mecanismos de transporte de menor intensidad.

Los valores obtenidos para ambas etapas se presentan en la Tabla 4.2, correspondientes exclusivamente a la Campaña de Durabilidad 1.

Tabla 4.2 Resultados de sorptividad inicial, sorptividad secundaria y coeficiente de correlación

Tipo de hormigón	Tasa de absorción inicial S_i (mm/s ^{1/2})	R ²	Variación respecto al patrón	Tasa de absorción secundaria S_s (mm/s ^{1/2})	R ²	Variación respecto al patrón
Patrón sup	0.0131	0.9	-	0.0041	0.98	-
Patrón inf	0.0131	0.88	-	0.0037	0.97	-
M-A5050-0.05 I sup	0.0117	0.92	11%	0.0048	0.98	-17%
M-A5050-0.05 I inf	0.0114	0.92	13%	0.0032	0.97	16%
M-A5050-0.05 II sup	0.0110	0.92	16%	0.0053	0.98	-29%
M-A5050-0.05 II inf	0.0096	0.91	26%	0.0028	0.98	25%

En la sorptividad inicial (S_i) todas las probetas con NFC presentan valores menores que el patrón, con reducciones entre 11% y 26%. Este efecto es más marcado en las caras inferiores (13% y 26% de disminución), lo que indica que la mezcla TG50%–TP50% 0,05% reduce de forma importante la velocidad de succión capilar en la etapa inicial, especialmente en la zona más densa del cilindro.

Para la sorptividad secundaria (S_s) se observa un comportamiento diferenciado según la posición. En las caras inferiores, las probetas con NFC muestran reducciones de 16% y 25% respecto del patrón, confirmando una menor tasa de absorción también en la fase tardía del ensayo. En cambio, en las caras superiores se registran aumentos de aproximadamente 17% y 29% (valores negativos en la tabla), lo que es coherente con las curvas $I-\sqrt{t}$ donde el hormigón con nanofibras continúa absorbiendo agua después de que el patrón se aproxima a la saturación.

En conjunto, la tabla muestra que las caras inferiores con NFC son las que presentan el mejor desempeño hidráulico, mientras que en la parte superior la mezcla modificada disminuye la succión inicial, pero mantiene una absorción más prolongada, consistente con el efecto de curado interno asociado a las nanofibras.

Los resultados del ensayo de absorción capilar permiten concluir que la incorporación de nanofibras TG50%–TP50% al 0,05% mejora de manera consistente el desempeño hidráulico del hormigón respecto del patrón. Las probetas con NFC mostraron menores tasas de sorptividad inicial y secundaria en la cara inferior, lo que evidencia una reducción significativa en la permeabilidad capilar y un refinamiento de la red porosa en la zona más densa del cilindro. En la cara superior, si bien la succión inicial también disminuyó, se observó una absorción más prolongada en etapas avanzadas,

comportamiento compatible con la presencia de curado interno, donde las nanofibras liberan humedad gradualmente y permiten una hidratación continua del cemento.

La integración de las curvas y de los valores de sorptividad confirma que el hormigón con nanofibras presenta una menor absorción capilar efectiva, especialmente en la parte inferior, junto con una capacidad de mantener la humedad interna por más tiempo en la zona superior. Esta combinación de menor permeabilidad temprana y de hidratación prolongada se traduce en un material con mayor resistencia al ingreso de agentes externos y, por tanto, con una mayor durabilidad potencial en comparación con el hormigón patrón.

4.7. Conclusiones

El conjunto de resultados experimentales presentados en este capítulo permite comprender de manera integral el efecto de las nanofibras de celulosa recicladas en el comportamiento del hormigón. La incorporación del aditivo generó una disminución sistemática de la trabajabilidad, coherente con la alta capacidad de las fibras para retener agua libre en la mezcla. No obstante, esta misma característica se tradujo en un proceso de curado interno más eficiente, reflejado en una evolución estable de la resistencia a compresión, con mezclas que igualaron o superaron al patrón en edades avanzadas, destacando particularmente la combinación TG50%–TP50% con 0.05% de adición.

El grado de hidratación, estimado a partir de la pérdida por ignición, corroboró este comportamiento, evidenciando que la presencia de nanofibras favorece una hidratación más sostenida en el tiempo. En términos de durabilidad, los ensayos de absorción capilar mostraron reducciones en la sorptividad e indicios de una microestructura más densa y menos permeable en las mezclas modificadas, especialmente en configuraciones morfológicas equilibradas. En conjunto, los resultados indican que pequeñas dosificaciones de nanofibras de celulosa recicladas pueden mejorar parámetros clave del desempeño del hormigón, consolidándolas como un aditivo viable para optimizar la hidratación interna, la respuesta mecánica y la resistencia al transporte de agua en materiales cementicios.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten discutir y concluir que la incorporación de nanofibras de celulosa recicladas en mezclas de hormigón constituye una estrategia viable para potenciar mecanismos de curado interno, mejorar la hidratación del cemento y favorecer la durabilidad del material, siempre que se utilicen proporciones y dosificaciones adecuadas. El análisis conjunto de la trabajabilidad, la resistencia mecánica, el grado de hidratación y el comportamiento frente a la absorción capilar permite evaluar de manera integrada el desempeño del hormigón modificado y, con ello, responder al objetivo general de este trabajo.

En primera instancia, la evaluación de la resistencia a la compresión mostró que las mezclas con NFC presentan un comportamiento dependiente tanto de la proporción morfológica entre fibras grandes (TG) y pequeñas (TP) como de la dosis utilizada. En edades tempranas, las mezclas mostraron resistencias similares al patrón, lo que es coherente con la retención inicial de agua por parte de las nanofibras. Sin embargo, en edades avanzadas se observaron incrementos significativos, particularmente en la mezcla TG50%–TP50% 5 con 0,05%, evidenciando el efecto positivo del curado interno al permitir una hidratación más prolongada y eficiente del cemento. Los resultados de larga duración (56 y 90 días) demostraron que esta mezcla supera consistentemente al patrón, confirmando que la incorporación de nanofibras puede contribuir a un desarrollo mecánico más sólido y estable en el tiempo.

El análisis del grado de hidratación mediante el ensayo *Loss on Ignition* (LOI) reforzó esta interpretación. Las mezclas con NFC presentaron valores de LOI coherentes con un proceso de hidratación sostenido, que se relaciona directamente con la capacidad de las fibras para almacenar y liberar agua gradualmente durante el fraguado y endurecimiento. Este comportamiento se alinea con la teoría del curado interno, en la cual las nanofibras actúan como reservorios de humedad capaces de mantener condiciones favorables para la formación de productos hidratados incluso después de la etapa inicial. La relación entre el grado de hidratación y la resistencia a la compresión evidenció que los valores positivos de DoH se corresponden con un mejor desempeño mecánico en edades avanzadas, reforzando la importancia de la humedad retenida en la microestructura.

La evaluación de la durabilidad mediante el ensayo de absorción capilar permitió complementar y profundizar esta discusión. Los resultados de sorptividad mostraron que las mezclas con NFC presentan reducciones claras en la absorción capilar inicial y secundaria en la cara inferior de las probetas, lo que indica una microestructura más densa y con menor permeabilidad efectiva que el hormigón patrón. En la cara superior se observó un comportamiento dual: menor succión inicial seguida de una absorción más sostenida, coherente con el proceso de curado interno previamente descrito. A nivel global, la mezcla TG50% – TP50% con 0,05% demostró una menor absorción capilar que el patrón, lo que sugiere una mayor resistencia al ingreso de agentes externos y una vida útil potencialmente superior.

La integración de estos resultados permite concluir que la mezcla TG 50% – TP 50% con una dosis de 0,05% corresponde a la combinación óptima dentro del marco experimental evaluado. Esta mezcla logra un equilibrio adecuado entre trabajabilidad, hidratación, resistencia mecánica y durabilidad. Si bien la incorporación de nanofibras redujo parcialmente la trabajabilidad inicial, esta limitación puede mitigarse mediante ajustes en la relación agua/cemento o mediante el uso de aditivos plastificantes, lo que constituye una línea de investigación futura relevante para mejorar la aplicabilidad de estas mezclas en obra. A pesar de esta disminución de fluidez, los beneficios observados en términos de hidratación interna, mejora mecánica sostenida y reducción de la permeabilidad justifican plenamente su consideración como aditivo funcional.

Finalmente, este estudio confirma la viabilidad del uso de nanofibras de celulosa recicladas como aditivo en hormigones estructurales, integrando principios de sostenibilidad y economía circular a través del aprovechamiento de residuos industriales. La evidencia experimental obtenida demuestra que es posible mejorar atributos clave del hormigón mediante adiciones mínimas de material reciclado, contribuyendo tanto al avance del conocimiento en materiales cementicios como al desarrollo de tecnologías más responsables con el entorno. Si bien aún existen aspectos por explorar, como la optimización de la adición en función de la trabajabilidad, el comportamiento a escala real y la interacción con aditivos químicos, los resultados alcanzados establecen una base sólida para el diseño de hormigones más durables, eficientes y sustentables.

GLOSARIO

a/c	=	Relación agua/cemento.
ASTM	=	American Society for Testing and Materials.
C – H – S	=	Silicato de calcio hidratado, principal producto de hidratación del cemento.
C ₂ S	=	Silicato dicálcico.
C ₃ A	=	Aluminato tricálcico.
C ₃ S	=	Silicato tricálcico.
C ₄ S	=	Silicato tricálcico.
C ₄ AF	=	Ferroaluminato tetracálcico.
CH	=	Hidróxido de calcio (portlandita).
cm	=	Centímetro. Unidad de longitud.
CSH	=	Gel de silicato de calcio hidratado.
DoH	=	Degree of Hydration (Grado de hidratación del cemento).
g	=	Gramo. Unidad de masa.
g/cm ³	=	Densidad.
g/m ²	=	Carga superficial de absorción.
H ₂ O	=	Agua. Fórmula química.
I(t)	=	Absorción capilar acumulada en función del tiempo.
INF	=	Cara inferior de la probeta de hormigón.
Kg/m ³	=	Kilogramos por metro cúbico.
LOI	=	Loss on Ignition (Pérdida por ignición).
m	=	Metro. Unidad de longitud.
m ₁	=	Masa con muestra seca.
m ₂	=	Masa con muestra calcinada.

mg	=	Miligramo. Unidad de masa.
mm	=	Milímetro. Unidad de longitud.
MPa	=	Megapascal.
NFC	=	Nanofibra(s) de celulosa.
<i>nm</i>	=	Nanómetro. Unidad de longitud.
S	=	Sorptividad.
S_i	=	Sorptividad inicial.
S_s	=	Sorptividad secundaria.
SUP	=	Cara superior de la probeta de hormigón.
TG	=	Fibra de celulosa tipo “grande”, comprendida en la literatura como T1.
TP	=	Fibra de celulosa tipo “pequeña”, comprendida en la literatura como T3.
μm	=	Micrómetro. Unidad de longitud.
%	=	Porcentaje.
°C	=	Grados Celsius.
Δm	=	Variación de masa.
$\sqrt{t}$	=	Raíz cuadrada del tiempo utilizada en el análisis ASTM C1585.

REFERENCIAS

- ASTM International. (2023). ASTM C595/C595M-23. Standard specification for blended hydraulic cements. *ASTM International*. https://www.astm.org/c0595_c0595m-23.html
- Habibi, Y., Lucia, L. A., y Rojas, O. J. (2010). Cellulose nanocrystals: Chemistry, self-assembly, and applications. *Chemical Reviews*, 110(3), 1368–1399. <https://doi.org/10.1021/cr900339w>
- Hewlett, P., y Liska, M. (Eds.). (2019). *Lea's chemistry of cement and concrete* (5th ed.). Butterworth-Heinemann.
- Hisseine, O. A., Wilson, W., Tagnit-Hamou, A., *et al.* (2019). Nanocellulose for improved concrete performance: A macro-to-micro investigation for disclosing the effects of cellulose filaments on strength of cement systems. *Construction and Building Materials*, 207, 452–463. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.042>
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2009a). Construcción – Hormigón – Determinación de la docilidad – Método del asentamiento del cono de Abrams (NCh 1019.Of2009).
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2009b). Hormigón – Ensayo de compresión – Determinación de la resistencia a la compresión – Probetas cúbicas y cilíndricas (NCh 1037.Of2009).
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2016). Hormigón – Requisitos generales (NCh 170:2016).
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2021). Cemento – Terminología, clasificación y requisitos generales (NCh 148:2021).
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2022). Agua para la elaboración de hormigones – Requisitos (NCh 1498:2022).

- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2024). Áridos para morteros y hormigones – Requisitos (NCh 163:2024).
- Klemm, D., Kramer, F., Moritz, S., Lindström, T., Ankerfors, M., Gray, D., & Dorris, A. (2011). Nanocelluloses: A New Family of Nature-Based Materials. *Angewandte Chemie International Edition*, 50(24), 5438-5466. <https://doi.org/10.1002/anie.201001273>
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., y Panarese, W. C. (2011). *Design and control of concrete mixtures* (15th ed.). Portland Cement Association.
- Mehta, P. K., y Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Mejdoub, R., Hammi, H., Suñol, J. J., Khitouni, M., M'Nif, A., & Boufi, S. (2016). Nanofibrillated cellulose as nanoreinforcement in Portland cement: Thermal, mechanical and microstructural properties. *Journal Of Composite Materials*, 51(17), 2491-2503. <https://doi.org/10.1177/0021998316672090>
- Moon, R. J., Martini, A., Nairn, J., Simonsen, J., y Youngblood, J. (2011). Cellulose nanomaterials review: Structure, properties and nanocomposites. *Chemical Society Reviews*, 40(7), 3941–3993. <https://doi.org/10.1039/c0cs00108b>
- Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson.
- Onuaguluchi, O., y Banthia, N. (2016). Plant-based natural fiber reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 68, 96–108. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.02.014>
- Parveen, S., Rana, S., & Figueiro, R. (2013). A Review on Nanomaterial Dispersion, Microstructure, and Mechanical Properties of Carbon Nanotube and Nanofiber Reinforced Cementitious Composites. *Journal Of Nanomaterials*, 2013(1). <https://doi.org/10.1155/2013/710175>

Scrivener, K. L., y Nonat, A. (2011). Hydration of cementitious materials, present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 651–665. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.026>

ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ☐ ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ☐ ODS-2 : Hambre cero.
- ☐ ODS-3 : Salud y bienestar.
- ☐ ODS-4 : Educación de calidad.
- ☐ ODS-5 : Igualdad de género.
- ☐ ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ☐ ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ☐ ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ☒ ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ☐ ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ☒ ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ☒ ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ☐ ODS-13 : Acción por el clima.
- ☐ ODS-14 : Vida Submarina.
- ☐ ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ☐ ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ☐ ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación

La presente memoria de título se vincula directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible orientados a la innovación en materiales de construcción y a la promoción de entornos urbanos más sostenibles. El estudio aborda la incorporación de nanofibras de celulosa recicladas, obtenidas desde sacos de cemento posconsumo, como aditivo para mejorar el curado interno y el desempeño del hormigón, lo que se relaciona con el ODS 9 al fomentar el desarrollo de soluciones tecnológicas basadas en la valorización de residuos y en la optimización de procesos constructivos. Adicionalmente, el trabajo se enmarca en el ODS 11, ya que la incorporación de materiales reciclados y de menor impacto ambiental contribuye a prácticas constructivas más responsables y coherentes con los desafíos actuales de la sostenibilidad urbana. En este mismo contexto, la investigación también se vincula con el ODS 12, al promover estrategias de producción y consumo responsables mediante la reutilización de residuos industriales como materia prima. La mejora en la hidratación, la durabilidad y la estabilidad del hormigón permite avanzar hacia materiales más eficientes y compatibles con estrategias de reducción de impactos ambientales.

ANEXO 2.1: MÉTODO DE OBTENCIÓN DE NANOFIBRAS DE CELULOSA RECICLADA Y COMPARACIÓN DE ESTUDIOS PREVIOS

2.1.1 Limpieza y recuperación de la fibra

El objetivo primordial de esta fase fue obtener una materia prima con un contenido mínimo de material inorgánico residual (cenizas), lo cual es crucial para la eficiencia del proceso de fibrilación y para proteger los equipos de alta presión. El procedimiento de limpieza y recuperación incluyó las siguientes etapas:

- **Trozado y tamizado inicial:** Los sacos de cemento posconsumo fueron trozados manualmente hasta un tamaño menor a 5 cm. Posteriormente, el material se tamizó con un tamiz metálico de mesh 14 para remover los residuos de cemento más grandes y superficiales.
- **Separación por aire comprimido:** Se utilizó un sistema de separación de material particulado que, mediante la inyección controlada de aire comprimido a una presión de 4 bar, generó la turbulencia necesaria para liberar y remover las cenizas remanentes. Este proceso, aplicado en ciclos múltiples, permitió reducir el contenido final de cenizas a un valor promedio del 3%.
- **Pulpaje y lavado:** La fibra limpia fue rehidratada durante un mínimo de 4 horas y dispersada mediante un desintegrador de papelería (pulper), que agita las fibras a 2930 rpm por 5 minutos. Finalmente, la pulpa fue lavada para eliminar tintas y centrifugada para optimizar el contenido de sólidos previo a la etapa de fibrilación.

2.1.2 Producción enzimática – mecánica

Las fibras recuperadas fueron caracterizadas, presentando un contenido residual de lignina inferior al 5% y un índice Kink que confirmaba su aptitud para la fibrilación. La obtención de los distintos tamaños de nanofibras (NFC 1, NFC 2 y NFC 3) se efectuó a través de un proceso enzimático-mecánico, el cual combina la siguiente secuencia:

- Tratamiento enzimático: Se aplicó un complejo de celulasas a $48 \pm 2^\circ\text{C}$ durante un periodo de 60 minutos.
- Refinación mecánica: Se utilizó un molino PFI o un refinador de discos para iniciar la reducción dimensional de las fibras.
- Homogeneización a alta presión: Para alcanzar la escala nanométrica, la pulpa refinada fue sometida a cinco ciclos de homogeneización a alta presión, con rangos de presión entre 600 y 800 bar.

2.1.3 Caracterización y rol funcional del aditivo

Mediante la variación en las etapas de producción, se obtuvieron lotes de NFC con distintas características morfológicas, esenciales para el diseño experimental. Los resultados de la caracterización morfológica del segundo lote son referenciales en la Tabla 2.1.

Tabla A.2.1.1 Caracterización de nanofibras de celulosa

Muestra	Tratamiento	Diámetro promedio (nm)	Largo aparente (μm)	Relación de aspecto
NFC 1 (TG)	Refinación	126	18.85	150
NFC 3 (TP)	Doble enzimático, refinación y homogeneización	20	5.01	240

La diferencia de tamaños entre las muestras permite una acción dual del aditivo en la matriz cementicia:

- NFC 1 de tamaño grande (TG): Fibras de mayor diámetro, que funcionan principalmente como filler fibroso, aportando a la estabilidad volumétrica y al control de la exudación.
- NFC 3 de tamaño pequeño (TP): Fibras con dimensiones más cercanas a la escala nanométrica y mayor relación de aspecto. Estas nanofibras son fundamentales como agentes de curado interno, debido a su alta capacidad hidrofílica, la cual les permite retener el agua de la mezcla fresca y liberarla controladamente durante el proceso de hidratación.

Esta acción dual es crucial para optimizar la hidratación del cemento y para limitar la formación y propagación del microagrietamiento en el hormigón, impactando directamente en la mejora de la durabilidad en ambientes exigentes. Por esta razón, el estudio se enfoca en determinar una

combinación óptima y sinérgica de los tamaños TG y TP que maximice la resistencia mecánica, el curado interno y la durabilidad del hormigón.



Figura A.0.1.1 Nanofibra de celulosa utilizada, tamaño grande y tamaño pequeño



Figura A.0.1.2 Nanofibra de celulosa suspensión acuosa

2.1.4 Comparación de estudios previos

En la Tabla A.2.1.2 se presenta una síntesis comparativa de los principales estudios desarrollados en la Universidad de Concepción sobre la aplicación de nanofibras de celulosa recicladas en materiales cementicios. La tabla reúne información relativa a los autores, los tipos y concentraciones de fibra empleadas, las propiedades evaluadas y los resultados más relevantes obtenidos en cada investigación, permitiendo visualizar de manera integrada los avances logrados a nivel institucional y las tendencias observadas en torno al uso de este tipo de aditivo en morteros y hormigones.

Tabla A.0.1.2 Síntesis comparativa de estudios Universidad de Concepción

Autor y año	Tipo de fibra	% de adición	Propiedades evaluadas	Principales resultados
Cifuentes (2024)	NFC recicladas de sacos de cemento en dos tamaños distintos.	0.05%-0.1%	Curado interno, resistencia en morteros.	Incremento del grado de hidratación. Aumento de resistencia inicial. Menor pérdida de masa.
Aroca (2025)	NFC recicladas de sacos de cemento en tres tamaños distintos.	0.1%-0.2%	Docilidad, resistencia a compresión/flexión, contenido de humedad, curado interno, evaluación de durabilidad.	Mayor humedad interna asociada a curado interno; reducción de retracción autógena; mejoras en resistencia mecánica; indicios de microestructura más densa.
Muñoz (2025)	NFC recicladas de sacos de cemento en dos distintos tamaños	0.05%-0.1%	Corrosión acelerada, durabilidad en ambiente marino, resistencia mecánica.	Las fibras más pequeñas entregan mayor resistencia a compresión. Mayor durabilidad en ambientes marinos, con retraso de corrosión y menor penetración de cloruros.

ANEXO 3.1: COMPONENTES DE MEZCLAS CEMENTICIAS

3.1.1 Cemento

El cemento empleado en la elaboración de las mezclas corresponde a un cemento puzolánico Portland, específicamente de marca Cementos Bío Bío, proveniente de la Región del Biobío, Chile.

Este tipo de cemento se caracteriza por contener adiciones minerales de tipo puzolánico, que reaccionan con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del clínker, en un proceso que favorece la formación de compuestos hidratados (C–S–H) adicionales. Esto resulta en una matriz de hormigón más densa y una mejora sustancial en la durabilidad.

De acuerdo con la Norma Chilena NCh 148: 2021 – Cementos: Terminología, clasificación y requisitos, este material se clasifica como CPII-P (Cemento Portland con Adición Principal de Puzolana). Esta clasificación es equivalente al Tipo IP (*Blended Hydraulic Cement*) según la normativa ASTM C 595. Las propiedades físicas y químicas del cemento utilizado cumplen con los requisitos y límites establecidos por la normativa nacional vigente, garantizando su calidad para aplicaciones estructurales y de laboratorio.



Figura A.3.1.1 Cemento Bio Bio especial, utilizado para todas las confecciones

3.1.2 Agua

El agua utilizada para la confección de las mezclas fue agua potable de red, proveniente del sistema de abastecimiento urbano de la ciudad de Concepción.

Su uso se encuentra respaldado por los requisitos de la NCh1498:2022 – Hormigón y mortero – Agua de amasado – Requisitos, la cual establece que el agua destinada al amasado y curado del hormigón debe estar libre de impurezas orgánicas, aceites o sales que puedan afectar el proceso de fraguado o la adherencia entre los componentes.

Las mezclas fueron elaboradas con una relación agua/cemento (a/c) de 0.50, constante en todas las tandas de fabricación, valor determinado como óptimo en estudios previos realizados en el Laboratorio de Hormigones de la Universidad de Concepción.

3.1.3 Áridos

Se emplearon áridos naturales de tipo fino (arena) y grueso (grava), adquiridos en Sodimac bajo la marca Arenas Costanera Bío Bío, en sacos de 25 kg.

Antes de su utilización, ambos materiales fueron sometidos a ensayos de caracterización física y granulométrica, conforme a las normas nacionales NCh1116:2018 Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente, NCh1117:2010 Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades reales y neta y de la absorción de agua de las gravas, NCh 1239:2009 Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas. Además, se utilizó la norma NCh 165:2009 Áridos para morteros y hormigones – tamizado y determinación de la granulometría. Dichos resultados se encuentran en la sección 4.2.



Figura A.0.1.2 Árido fino utilizado en confecciones



Figura A.0.1.3 Árido grueso utilizado en confecciones

ANEXO 3.2: ENSAYOS DE FLUIDEZ Y RESISTENCIA

3.2.1 Ensayo de consistencia – Cono de Abrams

La trabajabilidad del hormigón fresco se determinó mediante el ensayo de asentamiento del cono de Abrams, según los lineamientos establecidos en la NCh1019:2009 Determinación de la consistencia mediante el asentamiento de cono de Abrams.

El molde troncocónico se llenó en tres capas de igual volumen, cada una compactada con 25 golpes de varilla. Luego de nivelar la superficie, se retiró el molde en sentido vertical y se midió el asentamiento (h) como la diferencia entre la altura del molde (300 mm) y la altura promedio del hormigón colapsado.

Este procedimiento permitió verificar la consistencia y homogeneidad inicial de las mezclas antes del moldeado de las probetas cilíndricas.



Figura A.0.2.1 Ensayo de consistencia

3.2.2 Ensayo de resistencia a la compresión uniaxial

La resistencia a la compresión fue determinada conforme a la NCh1037:2009 – Ensayo de compresión de probetas cilíndricas de hormigón, empleando probetas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, elaboradas y curadas según la NCh170:2016.

Las probetas fueron ensayadas a edades de 7, 14, 28, 56 y 90 días, utilizando una máquina de compresión hidráulica, aplicando una velocidad de carga controlada.

La resistencia a la compresión (f_c) se calculó mediante la expresión:

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (A31)$$

Donde:

f_c : Resistencia a la compresión (Mpa)

P: Carga máxima aplicada

A: Área transversal de la probeta

Los resultados corresponden al promedio de dos especímenes por edad de ensayo.



Figura A.0.2.2 Probeta en ensayo de compresión uniaxial

ANEXO 3.3: DOSIFICACIONES

El presente anexo reúne las dosificaciones completas empleadas en cada una de las coladas realizadas durante el programa experimental. Todas las mezclas fueron derivadas de las dosificaciones base definidas en el Capítulo 3, manteniendo la relación agua/cemento constante y aplicando las correcciones por humedad superficial de los áridos determinadas en los ensayos de caracterización. Para cada confección se detallan las cantidades efectivas de cemento, agua, áridos y nanofibras de celulosa utilizadas.

Tabla A.3.3.1 Dosificación confección 04/06/2025, destinada a ensayo de larga duración

Mezcla	Patrón	M-A5050-0.05	M-A8020-0.05	M-A2080-0.05
Cemento [Kg]	15.6	15.6	15.6	15.6
Arena [Kg]	28.1	28.1	28.1	28.1
Agua [Kg]	7.75	7.3	7.3	7.3
Gravilla [Kg]	35.9	35.9	35.9	35.9
Nanofibra TG	-	0.225	0.36	0.09
Nanofibra TP	-	0.225	0.09	0.36
Relación a/c	0.50	0.50	0.50	0.50

Tabla A.3.3.2 Dosificación confección 17/06/2025, destinada a comparación y verificación de M-A5050

Mezcla	Patrón	M-A5050-0.05	M-A5050-0.1
Cemento [Kg]	15.6	15.6	15.6
Arena [Kg]	28.4	28.4	28.4
Agua [Kg]	7.75	7.3	6.85
Gravilla [Kg]	36.3	36.3	36.3
Nanofibra TG	-	0.225	0.45
Nanofibra TP	-	0.225	0.45
Relación a/c	0.50	0.50	0.50

Tabla A.3.3.3 Dosificación confección 18/07/2025, destinada a durabilidad 1 y verificación de M-A5050-0.05

Mezcla	Patrón	M-A5050-0.05
Cemento [Kg]	15.6	15.6
Arena [Kg]	28.4	28.4
Agua [Kg]	7.75	7.3
Gravilla [Kg]	36.4	36.4
Nanofibra TG	-	0.225
Nanofibra TP	-	0.225
Relación a/c	0.50	0.50

Tabla A.3.3.4 Dosificación confección 30/07/2025, destinada a durabilidad 2 y verificación de M-A5050-0.05

Mezcla	Patrón	M-A5050-0.05
Cemento [Kg]	15.6	15.6
Arena [Kg]	28.4	28.4
Agua [Kg]	7.75	7.3
Gravilla [Kg]	36.4	36.4
Nanofibra TG	-	0.225
Nanofibra TP	-	0.225
Relación a/c	0.50	0.50

ANEXO 4.1: GRANULOMETRÍA

En el presente anexo se incluyen las curvas granulométricas correspondientes a la arena ensayada el 16/04/2025, junto con las curvas obtenidas para los dos áridos gruesos caracterizados en la jornada del 16/04/2025 y 26/06/2025. Estas curvas permiten visualizar la distribución de tamaños de partícula de cada material y complementan la información presentada en la sección de caracterización de áridos.

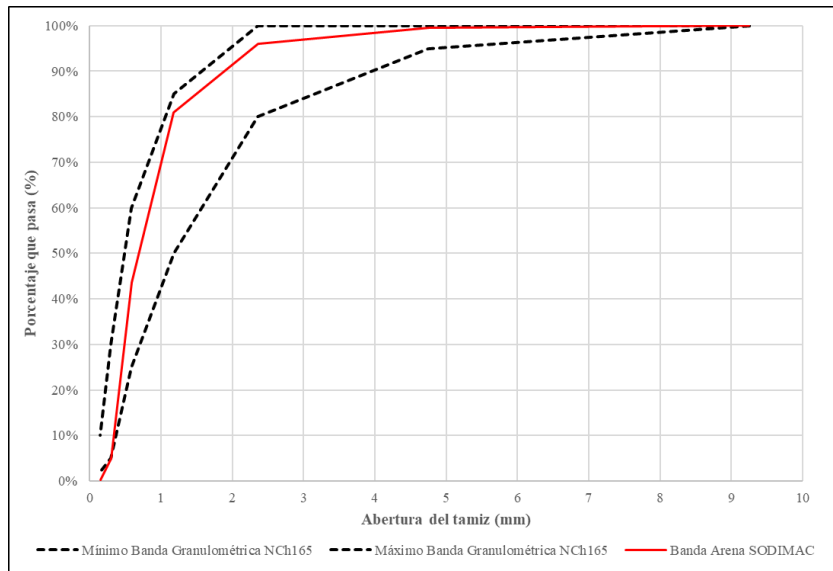


Figura A.4.1.1 Curva granulométrica de árido fino (arena) 16-04-2025

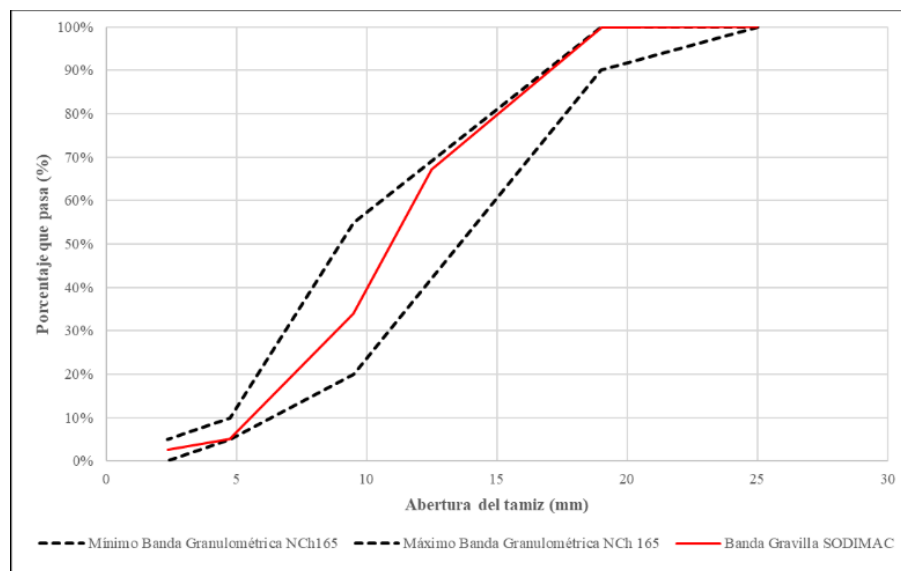


Figura A.4.1.2 Curva granulométrica de árido grueso (grava) 16-04-2025

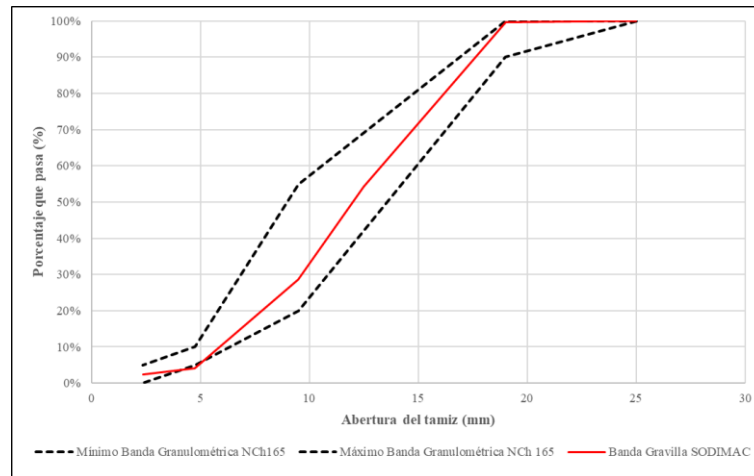


Figura A.4.1.3 Curva granulométrica de árido grueso (grava) 26-06-2025

ANEXO 4.2: CURVAS DE ABSORCIÓN CAPILAR

Se incorporan a continuación las curvas de absorción capilar correspondientes a la comparación entre las caras superior e inferior de las probetas evaluadas en la campaña de durabilidad 1. Estas gráficas permiten complementar el análisis del comportamiento hidráulico, mostrando con mayor claridad cómo varía la tasa de absorción en función de la orientación del corte y de la presencia de nanofibras de celulosa.

Se presenta la probeta patrón y la mezcla modificada con nanofibra de celulosa TG50%–TP50% II, cuya versión I fue previamente analizada en la sección 4.6.1. La incorporación de estas figuras permite visualizar las diferencias en el ingreso capilar de agua entre ambas caras.

Con estas gráficas, se completa el análisis comparativo entre cara superior e inferior, proporcionando una visión más detallada del comportamiento capilar en función de la morfología interna de cada probeta y reforzando la interpretación de los resultados discutidos en la sección.

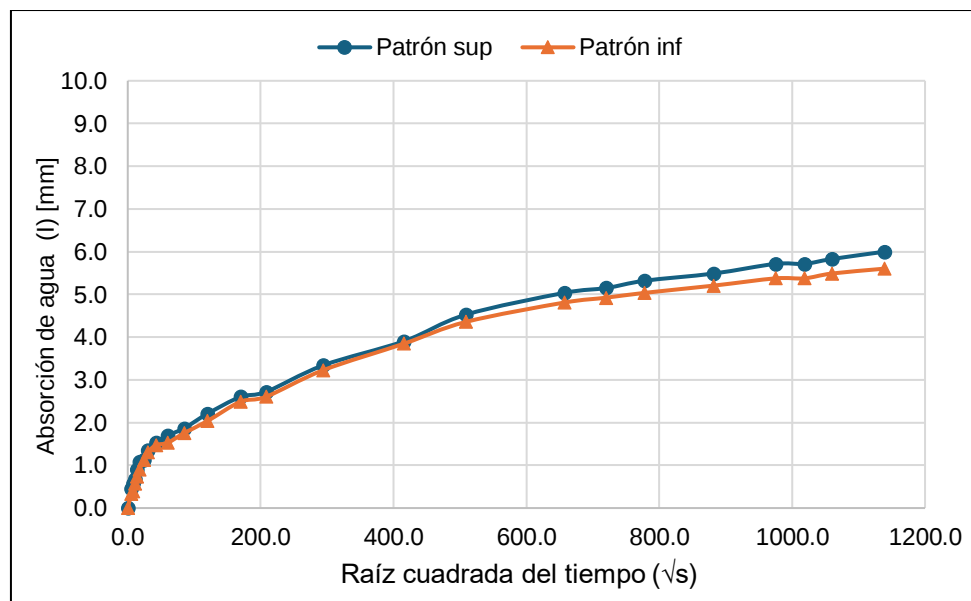


Figura A.4.2.1 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte inferior y superior patrón

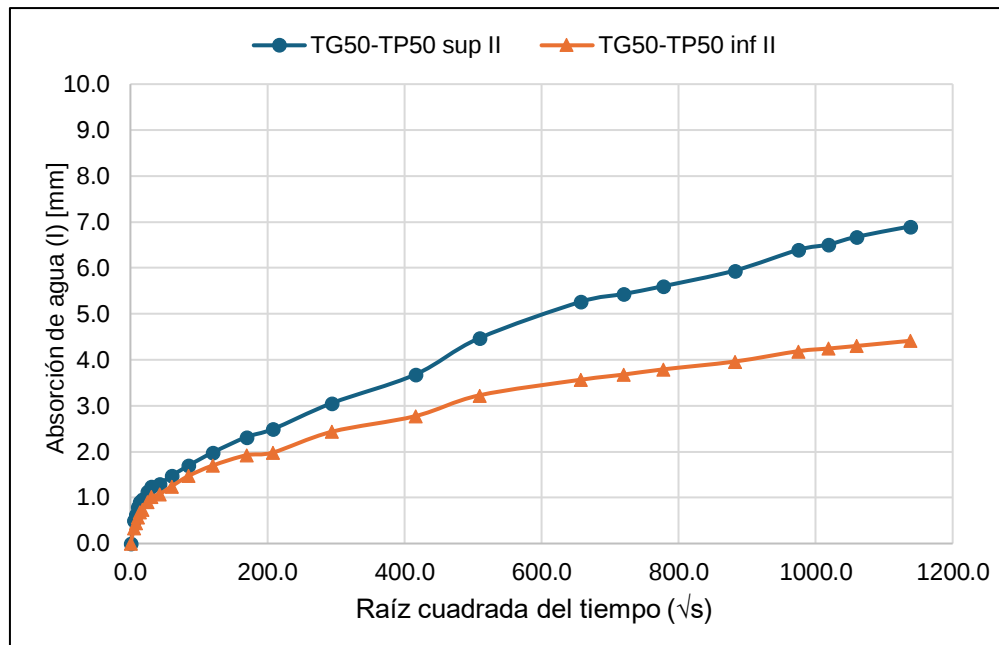


Figura A.4.2.2 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte inferior y superior TG50%-TP50% probeta II

ANEXO 4.3: DATOS OBTENIDOS DE ENSAYO DE TRABAJABILIDAD

En este anexo se incluyen las tablas con los resultados completos del ensayo de trabajabilidad para cada una de las confecciones realizadas, junto con la variación porcentual respecto de la mezcla patrón. Estos antecedentes complementan la información presentada en el cuerpo principal del documento y permiten revisar en detalle el comportamiento del asentamiento en función de la proporción de nanofibras y del porcentaje de adición utilizado.

Tabla A.4.3.1 Resultados del ensayo de trabajabilidad (14/05/2025)

Mezcla	Patrón 14/05/2025	M-A5050-0.05	M-A8020-0.05	M-A2080-0.05
Descenso de cono (cm)	5.5	3.0	3.5	2.5
Variación porcentual respecto al patrón	-	-45%	-36%	-55%

Tabla A.4.3.2 Resultados del ensayo de trabajabilidad (16/05/2025)

Mezcla	Patrón 16/05/2025	M-A5050-0.1	M-A8020-0.05	M-A2080-0.05
Descenso de cono (cm)	6.0	2.0	2.0	1.0
Variación porcentual respecto al patrón	-	-67%	-67%	-83%

Tabla A.4.3.3 Resultados del ensayo de trabajabilidad (04/06/2025)

Mezcla	Patrón 04/06/2025	M-A5050-0.05	M-A8020-0.05	M-A2080-0.05
Descenso de cono (cm)	5.0	3.0	3.5	2.0
Variación porcentual respecto al patrón	-	-40%	-30%	-60%

Tabla A.4.3.4 Resultados del ensayo de trabajabilidad (17/06/2025)

Mezcla	Patrón 17/06/2025	M-A5050-0.05	M-A5050-0.01
Descenso de cono (cm)	6.5	2.0	1.0
Variación porcentual respecto al patrón	-	-69%	-85%

Tabla A.4.3.5 Resultados del ensayo de trabajabilidad (18/07/2025)

Mezcla	Patrón 18/07/2025	M-A5050-0.05
Descenso de cono (cm)	6.5	4.0
Variación porcentual respecto al patrón	-	-38%

Tabla A.4.3.6 Resultados del ensayo de trabajabilidad (30/07/2025)

Mezcla	Patrón 30/07/2025	M-A5050-0.05
Descenso de cono (cm)	6.0	5.0
Variación porcentual respecto al patrón	-	-17%

ANEXO 4.4: DATOS OBTENIDOS DE ENSAYO DE COMPRESIÓN UNIAXIAL

A continuación, se presentan los datos obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión realizados para todas las confecciones consideradas en el programa experimental. Las mediciones incluyen los parámetros geométricos de cada probeta, particularmente la altura (H) y el diámetro (d), además del peso, la resistencia individual y el valor promedio correspondiente a cada serie. Estos registros permiten validar la uniformidad dimensional de las muestras y asegurar la correcta aplicación de la normativa durante el proceso de ensayo.

Confección 14/05/2025

Tabla A.4.4.1 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión probeta patrón

Mezcla patrón										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
7 Días	-	1	298	298,0	150	150,0	12,7	19,7	19,5	2395,6
			298		150					
		2	298	297,5	149	149,5	12,5	19,4		2348,4
			297		150					
14 Días	-	1	294	295,0	150	150,0	12,5	26,2	25,2	2348,4
			296		150					
		2	296	296,0	150	150,5	12,5	24,2		2357,9
			296		151					
28 Días	-	1	295	295,5	150	149,5	12,5	28,7	29,8	2348,4
			296		149					
		2	296	296,0	150	149,5	12,5	30,9		2357,9
			296		149					

Tabla A.4.4.2 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla TG-TP 0.05% (7días)

Mezcla TG-TP 0.05%										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
7 Días	50% T1 - 50% T3	1	296	295,0	150	150,0	12,5	19,1	19,3	2357,9
			294		150					
		2	297	297,0	149	149,0	12,5	19,4		2357,9
			297		149					
	80% T1 - 20% T3	1	296	296,0	149	149,0	12,6	16,6	16,4	2367,3
			296		149					
		2	297	297,0	149	149,5	12,5	16,1		2348,4
			297		150					
	20% T1 - 80% T3	1	297	297,0	149	149,0	12,6	17,9	18,1	2367,3
			297		149					
		2	297	297,0	149	149,0	12,5	18,3		2357,9
			297		149					

Tabla A.4.4.3 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla TG-TP 0.05% (14 y 28 días)

Mezcla TG-TP 0.05%										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
14 Días	50% T1 - 50% T3	1	301	301,0	152	152,0	13,1	23,2	23,0	2471,0
			301		152					
		2	295	295,5	150	149,5	12,4	22,8		2329,6
			296		149					
	80% T1 - 20% T3	1	297	297,0	149	149,5	12,5	22,78	22,3	2357,9
			297		150					
		2	297	297,0	149	149,5	12,5	21,81		2348,4
			297		150					
	20% T1 - 80% T3	1	296	296,0	149	149,0	12,4	22,03	22,1	2339,0
			296		149					
		2	295	295,0	149	149,0	12,35	22,26		2329,6
			295		149					
28 Días	50% T1 - 50% T3	1	297	297,0	150	150,0	12,5	28,2	28,1	2348,4
			297		150					
		2	297	296,5	150	150,0	12,5	28,0		2348,4
			296		150					
	80% T1 - 20% T3	1	295	295,0	150	150,0	12,5	25,0	25,1	2348,4
			295		150					
		2	295	295,0	150	150,0	12,5	25,2		2357,9
			295		150					
	20% T1 - 80% T3	1	296	296,0	149	149,0	12,4	27,6	27,1	2339,0
			296		149					
		2	295	295,0	149	149,0	12,4	26,6		2339,0
			295		149					

Confección 16/05/2025**Tabla A.4.4.4 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla patrón**

Mezcla patrón										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [cm]	H prom. [cm]	d [cm]	d prom. [cm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
7 Días	-	1	297	297,0	150	149,5	12,5	18,7	18,9	2357,9
			297		149					
		2	297	296,5	149	149,5	12,6	19,1		2376,7
			296		150					
14 Días	-	1	297	297,5	150	150,0	12,7	23,6	23,9	2386,1
			298		150					
		2	296	296,0	149	149,5	12,5	24,3		2357,9
			296		150					
28 Días	-	1	297	297,0	149	149,0	12,6	28,7	29,1	2367,3
			297		149					
		2	297	297,0	150	150,0	12,6	29,5		2367,3
			297		150					

Tabla A.4.4.5 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla TG-TP 0.1% (7 días)

Mezcla TG-TP 0.1%										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [cm]	H prom. [cm]	d [cm]	d prom. [cm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
7 Días	50% T1 - 50% T3	1	297	297,5	148	149,0	12,5	16,6	16,8	2357,9
			298		150					
		2	297	297,0	149	149,5	12,5	17,0		2357,9
			297		150					
	80% T1 - 20% T3	1	301	301,5	153	152,5	13,1	15,5	15,5	2471,0
			302		152					
		2	98	197,5	149	149,5	12,5	15,5		2348,4
			297		150					
	20% T1 - 80% T3	1	297	297,0	150	150,0	12,6	16,4	16,5	2367,3
			297		150					
		2	297	297,0	150	150,0	12,4	16,6		2339,0
			297		150					

Tabla A.4.4.6 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla TG-TP 0.1% (14 y 28 días)

Mezcla TG-TP 0.1%										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [cm]	H prom. [cm]	d [cm]	d prom. [cm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
14 Días	50% T1 - 50% T3	1	297	296,5	150	150,0	12,6	21,2	21,9	2367,3
			296		150					
		2	296	295,5	150	150,0	12,5	22,6		2357,9
			295		150					
	80% T1 - 20% T3	1	296	296,5	150	149,5	12,5	22,23	22,1	2357,9
			297		149					
		2	297	297,0	150	150,0	12,3	22,02		2320,1
			297		150					
	20% T1 - 80% T3	1	298	297,5	150	150,0	12,45	20,35	20,7	2348,4
			297		150					
		2	296	296,0	149	149,0	12,3	21,09		2320,1
			296		149					
28 Días	50% T1 - 50% T3	1	296	296,0	150	150,0	12,6	26,8	27,4	2367,3
			296		150					
		2	298	298,0	150	150,0	12,6	28,0		2376,7
			298		150					
	80% T1 - 20% T3	1	297	296,5	150	150,0	12,5	25,8	24,9	2348,4
			296		150					
		2	297	297,0	150	150,0	12,4	24,1		2339,0
			297		150					
	20% T1 - 80% T3	1	296	296,0	150	150,0	12,5	25,7	24,6	2348,4
			296		150					
		2	297	297,0	150	150,0	12,4	23,4		2339,0
			297		150					

Confección 04/06/2025**Tabla A.4.4.7 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla patrón larga duración**

Mezcla patrón										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m³]
28 Días	-	1	296	296,0	149	149,0	12,8	31,5	31,20	2405,0
			296		149					
		2	296	296,0	149	149,0	12,6	30,9		2376,7
			296		149					
56 Días	-	1	295	295,5	149	148,5	12,6	30,8	31,2	2376,7
			296		148					
		2	296	296,0	149	148,5	12,8	31,6		2405,0
			296		148					
90 Días	-	1	298	298,0	150	150,0	12,7	39,4	38,79	2386,1
			298		150					
		2	297	297,0	150	150,0	12,6	38,2		2376,7
			297		150					

Tabla A.4.4.8 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla 50%TG-50%TP 0.05% larga duración
NFC 50%TG-50%TP 0,05%

NFC 50%TG-50%TP 0,05%										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
28 Días	0.05%	1	295	295,0	150	150,0	12,4	27,58	27,93	2329,6
			295		150					
		2	295	295,0	150	150,0	12,6	28,27		2367,3
			295		150					
56 Días	0.05%	1	297	297,0	150	150,0	12,7	32,2	32,7	2386,1
			297		150					
		2	295	296,0	150	150,0	12,5	33,2		2357,9
			297		150					
90 Días	0.05%	1	296	296,0	149	149,0	12,5	40,5	39,6	2348,4
			296		149					
		2	297	297,0	150	150,0	12,6	38,8		2376,7
			297		150					

Tabla A.4.4.9 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla 80%TG-20%TP 0.05% larga duración

NFC 80% TG-20% TP										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
28 Días	0.05%	1	296	296,0	149	149,0	12,4	26,69	26,28	2339,0
			296		149					
		2	296	296,0	150	150,0	12,5	25,86		2348,4
			296		150					
56 Días	0.05%	1	297	297,0	150	150,0	12,7	28,8	30,1	2386,1
			297		150					
		2	297	297,0	149	149,0	12,5	31,5		2357,9
			297		149					
90 Días	0.05%	1	297	297,0	149	149,0	12,5	35,0	33,4	2348,4
			297		149					
		2	297	297,0	150	150,0	12,5	31,9		2357,9
			297		150					

Tabla A.4.4.10 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla 20%TG-80%TP 0.05% larga duración

NFC 20%TG-80%TP										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
28 Días	0.05%	1	296	296,0	150	150,0	12,4	28,72	30,44	2339,0
			296		150					
		2	297	297,0	150	150,0	12,7	32,15		2395,6
			297		150					
56 Días	0.05%	1	297	297,0	149	149,0	12,5	34,5	35,7	2357,9
			297		149					
		2	297	297,0	150	150,0	12,7	36,9		2386,1
			297		150					
90 Días	0.05%	1	297	297,0	151	150,5	12,7	40,6	38,8	2395,6
			297		150					
		2	297	297,0	150	150,5	12,5	37,1		2348,4
			297		151					

Confección 17/06/2025**Tabla A.4.4.11 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla patrón**

Mezcla patrón										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
7 Días	-	1	296	296,0	150	150,0	12,7	23,4	23,14	2386,1
			296		150					
		2	292	292,0	150	150,0	12,5	22,8		2348,4
			292		150					
14 Días	-	1	297	297,0	151	151,0	12,8	26,2	26,2	2405,0
			297		151					
		2	297	296,5	150	150,0	12,6	26,2		2376,7
			296		150					
28 Días	-	1	298	298,0	150	150,0	12,6	29,5	30,41	2367,3
			298		150					
		2	297	297,0	150	150,0	12,6	31,3		2376,7
			297		150					

Tabla A.4.4.12 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla 50% TG-50% TP 0.05%

50% TG - 50% TP 0,05%										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
7 Días	0.05%	1	297	296,5	150	150,0	12,7	23,46	23,6	2386,1
			296		150					
		2	297	297,0	150	150,0	12,8	23,72		2405,0
			297		150					
14 Días	0.05%	1	297	297,5	149	149,0	12,5	25,2	24,6	2357,9
			298		149					
		2	297	297,0	150	149,5	12,5	24,0		2348,4
			297		149					
28 Días	0.05%	1	298	298,0	150	150,0	12,8	33,5	32,0	2405,0
			298		150					
		2	301	301,0	150	150,0	13,3	30,5		2508,8
			301		150					

Tabla A.4.4.13 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla 50% TG-50% TP 0.05%

50% TG - 50% TP 0,1%										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resistencia Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
7 Días	0.1%	1	296	296,0	150	150,0	12,5	21,89	21,4	2348,4
			296		150					
		2	298	297,5	149	149,0	12,5	20,91		2357,9
			297		149					
14 Días	0.1%	1	297	296,5	150	150,0	12,6	24,7	24,8	2367,3
			296		150					
		2	296	295,5	150	150,0	12,5	24,8		2357,9
			295		150					
28 Días	0.1%	1	296	296,0	149	149,0	12,6	30,1	30,2	2367,3
			296		149					
		2	297	297,0	150	150,0	12,6	30,2		2376,7
			297		150					

Confección 18/07/2025**Tabla A.4.4.14 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla patrón**

Mezcla patrón										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
7 Días	-	1	297	297,0	150	150,0	12,6	20,1	20,69	2367,3
			297		150					
		2	297	297,0	149	149,0	12,5	21,3		2357,9
			297		149					
28 Días	-	1	297	297,0	150	150,0	12,7	33,0	33,4	2386,1
			297		150					
		2	297	297,0	149	149,0	12,5	33,8		2348,4
			297		149					

Tabla A.4.4.15 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla 50% TG-50% TP 0.05%

NFC 50%TG-50%TP 0,05%										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
7 Días	0.05%	1	297	297,0	149	149,0	12,5	20,82	20,91	2357,9
			297		149					
		2	296	296,0	149	149,0	12,5	21,00		2348,4
			296		149					
28 Días	0.05%	1	297	297,0	150	150,0	12,7	32,09	32,76	2386,1
			297		150					
		2	297	297,0	149	149,0	12,5	33,43		2357,9
			297		149					

Confección 30/07/2025**Tabla A.4.4.16 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla patrón**

Mezcla patrón										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
7 Días	-	1	297	297,0	149	149,0	12,5	17,7	18,52	2348,4
			297		149					
		2	297	297,0	149	149,0	12,4	19,4		2339,0
			297		149					
28 Días	-	1	297	297,0	150	150,0	12,6	30,3	29,1	2367,3
			297		150					
		2	296	296,0	149	149,0	12,5	27,9		2357,9
			296		149					

Tabla A.4.4.17 Dimensiones y resultados del ensayo de compresión mezcla 50%TG-50%TP 0.05%

NFC 50%T1-50%T3 0,05%										
Probetas			Descripción					Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	H [mm]	H prom. [mm]	d [mm]	d prom. [mm]	Peso [kg]	Resistencia [MPa]	Resist. Prom. [MPa]	Densidad [kg/m3]
7 Días	0.05%	1	297	297,0	150	150,0	12,6	21,59	21,54	2367,3
			297		150					
		2	297	297,0	149	149,0	12,5	21,49		2357,9
			297		149					
28 Días	0.05%	1	297	297,0	150	150,0	12,6	31,99	32,02	2367,3
			297		150					
		2	297	297,0	149	149,0	12,5	32,04		2348,4
			297		149					

ANEXO 4.5: DATOS OBTENIDOS ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR

En este anexo se presentan los datos experimentales utilizados para el cálculo de las curvas de absorción capilar de las diferentes probetas evaluadas. Para cada mezcla, se registró la masa inicial de la cara superior e inferior, el área expuesta, la densidad del agua considerada en el análisis y las masas medidas en cada intervalo de tiempo durante el ensayo. A partir de estas mediciones se determinó la absorción (I), parámetro que permite cuantificar la variación de masa normalizada en función del tiempo de contacto con el agua.

La información se muestra de manera completa, con todos los datos obtenidos mediante el ensayo, permitiendo reproducir el procedimiento de cálculo aplicado en la Sección 4.6 y respaldar los gráficos presentados en el capítulo correspondiente. Estos registros constituyen la base para interpretar el comportamiento capilar de cada probeta, diferenciando la respuesta de las caras superior e inferior y contrastando el desempeño entre la mezcla patrón y aquellas modificadas con nanofibras de celulosa.

Tabla A.4.5.1 Registros de absorción capilar y masa absorbida probeta patrón

Probeta Patrón								
m0 sup (g)	5711	m0 inf (g)	6091	A (cm2)	176,71	0,0177	d (g/mm3)	0,001
Tiempo (t) [min]	Tiempo (t) [s]	sqrt t (seg)	Masa Medida Sup (m) [g]	dm=m-mo [g]	I=dm/A [mm]	Masa Medida Inf (m) [g]	dm=m-mo [g]	I=dm/A [mm]
0	0	0,000	5711	0	0,000	6091	0	0,000
0,5	30	5,477	5719	8	0,453	6097	6	0,340
1	60	7,746	5721	10	0,566	6098	7	0,396
2	120	10,954	5723	12	0,679	6101	10	0,566
3	180	13,416	5727	16	0,905	6104	13	0,736
5	300	17,321	5730	19	1,075	6107	16	0,905
10	600	24,495	5731	20	1,132	6111	20	1,132
15	900	30,000	5735	24	1,358	6114	23	1,302
30	1800	42,426	5738	27	1,528	6117	26	1,471
60	3600	60,000	5741	30	1,698	6118	27	1,528
120	7200	84,853	5744	33	1,867	6122	31	1,754
240	14400	120,000	5750	39	2,207	6127	36	2,037
480	28800	169,706	5757	46	2,603	6135	44	2,490
720	43200	207,846	5759	48	2,716	6137	46	2,603
1440	86400	293,939	5770	59	3,339	6148	57	3,226
2880	172800	415,692	5780	69	3,905	6159	68	3,848
4320	259200	509,117	5791	80	4,527	6168	77	4,357
7200	432000	657,267	5800	89	5,036	6176	85	4,810
8640	518400	720,000	5802	91	5,150	6178	87	4,923
10080	604800	777,689	5805	94	5,319	6180	89	5,036
12960	777600	881,816	5808	97	5,489	6183	92	5,206
15840	950400	974,885	5812	101	5,715	6186	95	5,376
17280	1036800	1018,234	5812	101	5,715	6186	95	5,376
18720	1123200	1059,811	5814	103	5,829	6188	97	5,489
21600	1296000	1138,420	5817	106	5,998	6190	99	5,602
37440	2246400	1498,800	5831	120	6,791	6204	113	6,394

Tabla A.4.5.2 Registros de absorción capilar y masa absorbida mezcla TG50%-TP50% 0.05% I

NFC TG50%-TP50% 0,05% (I)								
m0 sup (g)	5794	m0 inf (g)	6052	A (cm2)	176,71	0,0177	d (g/mm3)	0,001
Tiempo (t) [min]	Tiempo (t) [s]	sqrt t (seg)	Masa Medida Sup (m) [g]	dm=m-mo [g]	I=dm/A [mm]	Masa Medida Inf (m) [g]	dm=m-mo [g]	I=dm/A [mm]
0	0	0,000	5794	0	0,000	6052	0	0,000
0,5	30	5,477	5804	10	0,566	6058	6	0,340
1	60	7,746	5805	11	0,622	6060	8	0,453
2	120	10,954	5807	13	0,736	6062	10	0,566
3	180	13,416	5809	15	0,849	6064	12	0,679
5	300	17,321	5811	17	0,962	6066	14	0,792
10	600	24,495	5814	20	1,132	6068	16	0,905
15	900	30,000	5817	23	1,302	6071	19	1,075
30	1800	42,426	5820	26	1,471	6074	22	1,245
60	3600	60,000	5823	29	1,641	6077	25	1,415
120	7200	84,853	5826	32	1,811	6081	29	1,641
240	14400	120,000	5832	38	2,150	6086	34	1,924
480	28800	169,706	5838	44	2,490	6091	39	2,207
720	43200	207,846	5841	47	2,660	6093	41	2,320
1440	86400	293,939	5853	59	3,339	6102	50	2,829
2880	172800	415,692	5864	70	3,961	6110	58	3,282
4320	259200	509,117	5876	82	4,640	6118	66	3,735
7200	432000	657,267	5889	95	5,376	6126	74	4,188
8640	518400	720,000	5891	97	5,489	6127	75	4,244
10080	604800	777,689	5894	100	5,659	6129	77	4,357
12960	777600	881,816	5899	105	5,942	6131	79	4,470
15840	950400	974,885	5906	112	6,338	6135	83	4,697
17280	1036800	1018,234	5907	113	6,394	6136	84	4,753
18720	1123200	1059,811	5910	116	6,564	6136	84	4,753
21600	1296000	1138,420	5913	119	6,734	6138	86	4,867
37440	2246400	1498,800	5944	150	8,488	6152	100	5,659

Tabla A.4.5.3 Registros de absorción capilar y masa absorbida mezcla TG50%-TP50% 0.05% II

Datos de ensayo probeta NFC TG50%-TP50% 0,05% (II)								
m0 sup (g)	5925	m0 inf (g)	6050	A (cm2)	176,71	0,0177	d (g/mm3)	0,001
Tiempo (t) [min]	Tiempo (t) [s]	sqrt t (seg)	Masa Medida Sup (m) [g]	dm=m-mo [g]	I=dm/A [mm]	Masa Medida Inf (m) [g]	dm=m-mo [g]	I=dm/A [mm]
0	0	0,000	5925	0	0,000000	6050	0	0,000
0,5	30	5,477	5934	9	0,509296	6056	6	0,340
1	60	7,746	5936	11	0,622473	6058	8	0,453
2	120	10,954	5939	14	0,792238	6060	10	0,566
3	180	13,416	5941	16	0,905415	6062	12	0,679
5	300	17,321	5942	17	0,962003	6063	13	0,736
10	600	24,495	5945	20	1,131768	6066	16	0,905
15	900	30,000	5947	22	1,244945	6068	18	1,019
30	1800	42,426	5948	23	1,301534	6069	19	1,075
60	3600	60,000	5951	26	1,471299	6072	22	1,245
120	7200	84,853	5955	30	1,697653	6076	26	1,471
240	14400	120,000	5960	35	1,980595	6080	30	1,698
480	28800	169,706	5966	41	2,320125	6084	34	1,924
720	43200	207,846	5969	44	2,489891	6085	35	1,981
1440	86400	293,939	5979	54	3,055775	6093	43	2,433
2880	172800	415,692	5990	65	3,678248	6099	49	2,773
4320	259200	509,117	6004	79	4,470486	6107	57	3,226
7200	432000	657,267	6018	93	5,262723	6113	63	3,565
8640	518400	720,000	6021	96	5,432489	6115	65	3,678
10080	604800	777,689	6024	99	5,602254	6117	67	3,791
12960	777600	881,816	6030	105	5,941785	6120	70	3,961
15840	950400	974,885	6038	113	6,394492	6124	74	4,188
17280	1036800	1018,234	6040	115	6,507669	6125	75	4,244
18720	1123200	1059,811	6043	118	6,677434	6126	76	4,301
21600	1296000	1138,420	6047	122	6,903788	6128	78	4,414
37440	2246400	1498,800	6080	155	8,771206	6148	98	5,546

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento	: Departamento de Ingeniería Civil
Carrera	: Ingeniería Civil
Nombre del memorista	: Miguel Ángel Figueroa Muñoz
Título de la memoria	: Evaluación de nanofibras de celulosa como aditivo para el curado interno y durabilidad del hormigón
Fecha de la presentación oral	:
Profesor(es) Guía	: Luis Merino Quilodrán
Profesor(es) Revisor(es)	: Sebastián Calderón
Concepto	:
Calificación	:

Resumen

Esta investigación evalúa el uso de nanofibras de celulosa recicladas, obtenidas desde sacos de cemento posconsumo, como aditivo para mejorar la hidratación interna y el desempeño del hormigón, contribuyendo al desarrollo de materiales de construcción más sostenibles. Debido a su alta capacidad de retención y liberación gradual de agua, estas fibras permiten prolongar el proceso de hidratación del cemento más allá del curado inicial, favoreciendo la formación de una microestructura más estable.

El estudio consideró mezclas con distintas proporciones entre fibras de tamaño grande (TG) y pequeño (TP), manteniendo una dosificación reducida del aditivo. Las propiedades de los hormigones fueron evaluadas mediante ensayos de trabajabilidad, resistencia mecánica, grado de hidratación y absorción capilar, lo que permitió analizar la influencia de las nanofibras en diferentes etapas del curado.

Los resultados mostraron una disminución de la trabajabilidad atribuida a la afinidad de las fibras por el agua. Se observaron mejoras en la resistencia a la compresión, asociadas a una hidratación prolongada generada por el curado interno. El análisis del grado de hidratación confirmó este comportamiento, especialmente en configuraciones equilibradas entre fibras TG y TP. Asimismo, la absorción capilar evidenció una reducción de la permeabilidad y una red porosa más densa.