



**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

Benjamín Andrés Andia Vargas

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

Abril 2026
Concepción (Chile)
© 2026 Benjamín Andrés Andia Vargas

© 2026 Benjamín Andrés Andia Vargas

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

DEDICATORIA

Con esto culmina una de las etapas formativas más importantes de mi vida, la cual no hubiese sido posible gracias a todo el esfuerzo que hay detrás. Por lo que este trabajo va dedicado a mi familia, en especial a mis padres, Dina y Pedro”, por su paciencia, amor infinito y por cada sacrificio que hicieron para sacar adelante a nuestra familia. Por entregar tiempo, fuerzas y sueños con tal de darme lo mejor, incluso lo que no estaba al alcance de sus manos. Gracias por enseñarme con el ejemplo, por formarme con valores y por impulsarme a ser siempre una mejor persona. Todo lo logrado hasta hoy es gracias a ustedes.

A mi hermana, a quien le debo un agradecimiento especial y profundo. Gracias por caminar este proceso conmigo, por luchar cada día para que estuviera bien, incluso desde la distancia. Por asumir un rol que fue mucho más que una hermana, convirtiéndote en mi segunda madre, en mi apoyo constante y en mi refugio. por hacer todo lo que estuvo a tu alcance para que no me faltara nada, incluso dejando de lado tus propios sueños y prioridades. Tu esfuerzo, entrega y amor es fundamental para que hoy esté aquí.

A mis amigos, quienes fueron un pilar fundamental para sobrellevar la vida universitaria, gracias por estar conmigo durante esta etapa, por el apoyo constante, las palabras de ánimo y los buenos momentos que hicieron de la universidad una experiencia más llevadera y especial. Gracias por estar, por creer y sumar siempre.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al proyecto **FONDEF ID23i10431** por el financiamiento parcial y por promover el desarrollo de iniciativas orientadas a la valorización de residuos.

Agradecimientos igualmente 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 ejecución del presente trabajo.

Se agradece 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.

De igual manera, se agradece al **Laboratorio de Hormigones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción**, en especial al Sr. Carlos Bustos, por su aporte con su sabiduría hacia el proyecto, y al Sr. Iván Muñoz por su generosidad, orientación y disposición durante el desarrollo de la investigación.

Agradezco al **profesor guía, Dr. Luis Merino**, por haber confiado en mi para desarrollar esta investigación, por su gestión, acompañamiento y apoyo incluso desde antes de llevar a cabo el trabajo.

Finalmente, se agradece al **profesor comisión, Sebastián Calderón**, por su tiempo, disposición y comentarios que contribuyeron al mejoramiento de este documento.

RESUMEN

El hormigón es el material de construcción más utilizado a nivel mundial, pero enfrenta importantes desafíos de durabilidad debido a la fisuración temprana y al curado interno deficiente, lo que facilita la penetración de agentes agresivos como los cloruros. Simultáneamente, la industria cementera requiere adoptar prácticas sostenibles orientadas a la economía circular. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar el comportamiento mecánico y de durabilidad del hormigón utilizando nanofibras de celulosa (NFC) obtenidas del reciclaje de sacos de cemento posconsumo, con el fin de utilizarlas como agentes de curado interno y densificación microestructural.

Para lograr este objetivo, se confeccionaron mezclas de hormigón incorporando NFC de tamaño grande (TG) y pequeño (TP) en concentraciones restrictivas de 0,05% y 0,1% respecto a la masa del cemento, contrastándolas con una mezcla patrón. En estado fresco, la adición redujo la docilidad entre un 20% y 30% en las dosis del 0,05%. En estado endurecido, la mezcla NFC-TG al 0,05% logró incrementar la resistencia a la compresión en hasta un 16,5% a los 28 días y reducir la sorptividad capilar en un 32%. Sin embargo, el análisis termogravimétrico (Pérdida por Ignición, LOI) arrojó grados de hidratación mayoritariamente negativos en comparación al hormigón patrón (alcanzando variaciones de hasta -8,1% a los 28 días).

A partir de la discusión de estos resultados, se concluye que las NFC no mejoran la composición química de la matriz mediante curado interno, ya que su alta capacidad hidrofílica genera aglomeraciones que retienen el agua y frenan la hidratación periférica del cemento. El éxito y aumento de resistencia radican en un mecanismo de refuerzo físico-mecánico: las nanofibras dispersas actúan como un puenteo estructural tridimensional (*crack bridging*) que enlaza microfisuras, absorbe energía de fractura y densifica los poros capilares. Por tanto, el uso de NFC-TG al 0,05% es una innovación viable para el refuerzo físico del hormigón, condicionado a estrictos protocolos de homogeneización.

ABSTRACT

Concrete is the most widely used construction material worldwide, but it faces significant durability challenges due to early-age cracking and deficient internal curing, which facilitates the penetration of aggressive agents such as chlorides. Simultaneously, the cement industry must adopt sustainable practices oriented towards a circular economy. In this context, the main objective of this study is to evaluate the mechanical and durability behavior of concrete using cellulose nanofibers (CNF) obtained from the recycling of post-consumer cement bags, in order to use them as internal curing and microstructural densifying agents.

To achieve this objective, concrete mixtures were prepared incorporating large (TG) and small (TP) size CNFs at restrictive concentrations of 0.05% and 0.1% relative to the cement mass, contrasting them with a control mixture. In the fresh state, the addition reduced workability by 20% to 30% at 0.05% dosages. In the hardened state, the optimal mixture (0.05% CNF-TG) achieved an increase in compressive strength of up to 16.5% at 28 days and a 32% reduction in capillary sorptivity. However, thermogravimetric analysis (Loss on Ignition, LOI) yielded mostly negative degrees of hydration compared to the control concrete (reaching variations of up to -8.1% at 28 days).

From the discussion of these results, it is concluded that CNFs do not improve the chemical composition of the matrix through internal curing, as their high hydrophilic capacity generates agglomerations that retain water and hinder the peripheral hydration of the cement. The success and increase in strength lie in a physical-mechanical reinforcement mechanism: the dispersed nanofibers act as a three-dimensional structural reinforcement (*crack bridging*) that links microcracks, absorbs fracture energy, and densifies capillary pores. Therefore, the use of 0.05% CNF-TG is a viable innovation for the physical reinforcement of concrete, contingent upon strict homogenization protocols.

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	5
CAPÍTULO 2: USO DE NANOFIBRAS DE CELULOSA EN MEZCLAS DE HORMIGÓN	6
2.1. Introducción	6
2.2. Componentes del hormigón y normativa nacional.....	6
2.2.1 Cemento	7
2.2.2 Áridos finos y gruesos	7
2.2.3 Agua de amasado	8
2.3. Nanofibras de celulosa (NFC).....	9
2.3.1 Clasificación de la nanocelulosa	9
2.3.2 Propiedades fisicoquímicas relevantes para matrices cementicias	10
2.4. Influencia de las NFC en matrices cementicias	10
2.4.1 Efecto sobre la reología y trabajabilidad.....	11
2.4.2 Dinámica de hidratación, nucleación y curado interno (DOH).....	11
2.4.3 Nanofibras de celulosa obtenidas del reciclaje de sacos de cemento.....	12
2.4.4 Síntesis interpretativa	13
2.5. Conclusiones	14
CAPÍTULO 3: METODOLOGIA.....	16

3.1.	Introducción	16
3.2.	Mezcla patrón y valores objetivos.....	16
3.3.	Porcentajes y tamaños de adición de NFC	17
3.4.	Caracterización de las materias primas	17
3.4.1	Cemento	18
3.4.2	Áridos	18
3.4.3	Agua de amasado	19
3.4.4	Nanofibras de celulosa	19
3.5.	Diseño de mezclas, nomenclatura.	20
3.6.	Dosificación y preparación de las mezclas	20
3.7.	Trabajo experimental.....	21
3.8.	Métodos de ensayo en estado fresco	22
3.8.1	Determinación de la docilidad (Cono de Abrams).....	22
3.8.2	Moldeo y curado de probetas	23
3.9.	Métodos de ensayo en estado endurecido	23
3.9.1	Ensayo de resistencia a la compresión	23
3.9.2	Ensayo de pérdida de masa por ignición (LOI).....	24
3.9.3	Absorción capilar	26
3.10.	Criterio de selección de mezcla optima.....	29
3.11.	Conclusiones	30
CAPÍTULO 4: RESULTADOS		31
4.1.	Introducción	31
4.2.	Resultados de áridos.....	31
4.2.1	Densidad y absorción de los áridos	31
4.2.2	Análisis granulométrico	32
4.3.	Determinación de la docilidad.....	33

4.4.	Resistencia a la compresión	37
4.5.	Perdida por ignición (LoI).....	45
4.6.	Absorción capilar	51
4.6.1	Resultados de sorptividad inicial y coeficiente de determinación (R^2).....	52
4.6.2	Resultados de sorptividad secundaria (S_s).....	54
4.7.	Conclusiones	56
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....		58
GLOSARIO		60
REFERENCIAS		62
ANEXO 1.1 CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE....		66
ANEXO 4.2 CURVAS DE ABSORCIÓN CAPILAR.....		67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Caracterización de Nanofibras de celulosa	13
Tabla 2.2 Síntesis estudios sobre nanofibras de celulosa.....	14
Tabla 3.1 Características de nanofibras de celulosa utilizadas	19
Tabla 3.2 Dosificación de materiales	21
Tabla 3.3 Programa experimental de confección y ensayos de las mezclas de hormigón	21
Tabla 4.1 Densidades y absorción de agua de los áridos	31
Tabla 4.2 Resultados de sorptividad inicial (S_i) y coeficiente de determinación (R^2) para las probetas de hormigón con y sin NFC. Campaña durabilidad I.....	52
Tabla 4.3. Resultados de sorptividad inicial (S_i) y coeficiente de determinación (R^2) para las probetas de hormigón con y sin NFC. Campaña durabilidad II	53
Tabla 4.5 Resultados de sorptividad secundaria (S_s) y coeficiente de determinación (R^2) para las probetas de hormigón con y sin NFC. Campaña Durabilidad I.	54
Tabla 4.6 Resultados de sorptividad secundaria (S_s) y coeficiente de determinación (R^2) para las probetas de hormigón con y sin NFC. Campaña Durabilidad II.	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura jerárquica de la celulosa	9
Figura 3.1 Cemento Bio Bio utilizado para la confección de hormigón.....	18
Figura 3.2 Árido grueso y fino empleado en la confección de hormigón.....	19
Figura 3.3 Ejecución del ensayo del cono de Abrams	22
Figura 3.4 Ensayo a compresión en probetas cilíndricas de hormigón	24
Figura 3.5 Montaje de ensayo de absorción capilar	29
Figura 4.1 Curva granulométrica de árido grueso 16/04/2025.....	32
Figura 4.2 Curva granulométrica de árido fino 16/04/2025.....	33
Figura 4.3 Curva granulométrica de árido grueso 26/06/2025.....	33
Figura 4.4 Descenso de cono de Abrams(cm) confección 12/05/2025.....	34
Figura 4.5 Descenso de cono de Abrams(cm) confección larga duración 03/06/2025.....	35
Figura 4.6 Descenso de cono de Abrams(cm) confección verificación 17/06/2025.....	36
Figura 4.7 Descenso de cono de Abrams(cm) confección durabilidad I 18/07/2025	36
Figura 4.8 Descenso de cono de Abrams(cm) confección durabilidad II 30/07/2025	37
Figura 4.9 Resistencia a compresión edades 7, 14 y 28 días confección 12/05/2025.....	38
Figura 4.10 Evolución de resistencia a compresión edades 7, 14 y 28 días confección 12/05/2025	39
Figura 4.11 Resistencia a compresión edades 28, 56 Y 90 días confección larga duración 03/06/2025	40
Figura 4.12 Evolución de resistencia a compresión edades 28, 56 y 90 días confección larga duración 03/06/2025.....	40
Figura 4.13 Resistencia a compresión edades 7, 14 y 28 días confección verificación 17/06/2025..	41
Figura 4.14 Evolución de resistencia a compresión edades 7, 14 y 28 días confección verificación 17/06/2025.....	41
Figura 4.15 Resistencia a compresión edades 7 y 28 días confección durabilidad I 18/07/2025	42
Figura 4.16 Evolución de resistencia a compresión edades 7 y 28 días confección durabilidad I 18/07/2025.....	43
Figura 4.17 Resistencia a compresión edades 7 y 28 días confección durabilidad II 30/07/2025	44
Figura 4.18 Evolución de resistencia a compresión edades 7 y 28 días confección durabilidad II 30/07/2025.....	44
Figura 4.19 LOI confección 12/05/2025	46
Figura 4.20 % variación LOI confección 12/05/2025	46

Figura 4.21 LOI confección larga duración	47
Figura 4.22 % variación LOI confección larga duración	47
Figura 4.23 LOI confección larga verificación	48
Figura 4.24 % variación LOI confección verificación	48
Figura 4.25 LOI confección Durabilidad I.....	49
Figura 4.26 % variación LOI confección Durabilidad I.....	49
Figura 4.27 LOI confección Durabilidad II	50
Figura 4.28 % variación LOI confección Durabilidad II	50
Figura A.4.0.1 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte superior y patrón Durabilidad I	67
Figura A.4.0.2 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte inferior y patrón Durabilidad I	68
Figura A.4.0.3 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte superior y patrón Durabilidad II.....	68
Figura A.4.0.4 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte inferior y patrón Durabilidad II.....	69
Figura A.4.0.5 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte superior promedio y patrón Durabilidad I.....	69
Figura A.4.0.6 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte inferior promedio y patrón Durabilidad I.....	70
Figura A.4.0.7 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte superior promedio y patrón Durabilidad II	70
Figura A.4.0.8 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte inferior promedio y patrón Durabilidad II.....	71

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El hormigón ha sido el material más utilizado a nivel mundial en la construcción debido a su versatilidad, disponibilidad de materias primas y alta capacidad de resistencia frente a cargas de compresión. Sin embargo, su aplicación en elementos de gran volumen (hormigón masivo) se ve enfrentada a desafíos significativos relacionados con su curado interno, el cual es vital para el desarrollo adecuado de sus propiedades mecánicas y físicas.

Si bien un diseño estructural adecuado debe considerar rigurosamente los ambientes de exposición y los posibles problemas que pueden ocurrir durante el ciclo de vida de la obra, el material sigue presentando vulnerabilidades intrínsecas, tales como la fisuración prematura por contracción y la permeabilidad capilar. Estas características facilitan el ingreso de agentes agresivos —tales como cloruros y sulfatos— y propician la corrosión del acero de refuerzo, reduciendo la vida útil proyectada de la infraestructura.

En paralelo, la industria de la construcción es una de las más importante en la economía chilena contribuyendo al P.I.B nacional en un 6,3% (De Solminihiac, 2020). Sin embargo, esta está ligada en gran parte a la industria productora de cemento la cual genera grandes cantidades de emisiones de dióxido de carbono. En la actualidad, la mayor parte de las estructuras de obras civiles están materializadas en base a hormigón el cual tiene como componente el cemento. La industria cementera representa el 8% de emisiones de dióxido de carbono del mundo (Lehne y Preston, 2018). Por lo que la industria del cemento enfrenta la presión de adaptarse a las demandas de sostenibilidad y el compromiso de contribuir a los objetivos de desarrollo sostenible que se espera lograr para el año 2030. Esta realidad impulsa la búsqueda de aditivos y materiales innovadores que permitan mejorar el desempeño del hormigón, extender su durabilidad y al mismo tiempo fomentar el uso de recursos renovables o derivados de residuos industriales.

Por este motivo, las nanofibras de celulosa (NFC) emergen como una alternativa prometedora. Obtenidas a partir de residuos lignocelulósicos de sacos de cemento posconsumo, las NFC presentan una alta capacidad de retención de agua y gran superficie específica. En lugar de reaccionar

químicamente con la matriz cementicia, estas nanofibras actúan mediante mecanismos físicos: funcionan como reservorios que mejoran el curado interno y operan como un refuerzo tridimensional que puentea microfisuras. Este mecanismo mitiga la retracción y contribuye a refinar la red de poros capilares, limitando la penetración de agentes agresivos y extendiendo la durabilidad de las estructuras a largo plazo.

La elaboración de probetas de hormigón con adición de nanofibras de celulosa se plantea, por tanto, como una oportunidad de investigación alineada con las necesidades actuales de la construcción para mejorar el desempeño estructural y avanzar hacia prácticas más sostenibles

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 comportamiento mecánico y de durabilidad de probetas de hormigón elaboradas con adición de nanofibras de celulosa mediante ensayos de compresión, absorción capilar y pérdida de masa por mufla.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Evaluar la resistencia a compresión de las probetas de hormigón confeccionadas con adición de nanofibras de celulosa reciclada, en su forma TG (fibra larga) y TP (fibra corta) por separado en concentraciones de 0,05% y 0,1% a las edades de 7, 14, 28, 56 y 90 días.
2. Evaluar el impacto de las nanofibras de celulosa recicladas de sacos de cemento en el grado de hidratación del hormigón mediante el ensayo *Loss on Ignition* (pérdida por ignición) en adelante LOI.
3. Determinar la durabilidad del hormigón con aditivo de nanofibras de manera indirecta usando como indicador de desempeño el ensayo de absorción capilar de agua.

4. Identificar la concentración y tamaño de nanofibras de mejor desempeño mediante un criterio de evaluación secuencial, priorizando en primera instancia la maximización de la resistencia a la compresión, para posteriormente validar su eficacia microestructural a través de indicadores de curado interno (LOI) y durabilidad (sorptividad capilar).

1.3. Alcance del estudio

El presente trabajo se centró en el análisis experimental de probetas de hormigón confeccionadas en laboratorio con la incorporación de nanofibras de celulosa en longitudes larga (TG) y corta (TP) en concentraciones 0,05% y 0,1% respecto a la masa del cemento. El estudio contempló el diseño, confección, curado y evaluación de probetas bajo condiciones controladas.

Se evaluaron las siguientes propiedades:

- Resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días para la mayoría de las confecciones y una evaluación a 28, 56 y 90 días como ensayo a larga duración de una de las confecciones, como parámetro mecánico fundamental para determinar la capacidad resistente de las mezclas.
- Absorción capilar, a fin de calcular la sorptividad y estimar la permeabilidad y durabilidad de las mezclas frente a la penetración del agua por la matriz porosa de los elementos de hormigón.
- Pérdida de masa en mufla, como técnica complementaria para dimensionar la hidratación del cemento en los distintos casos evaluados.

1.4. Plan de trabajo

El desarrollo de esta investigación se estructuró en una serie de etapas, las cuales están orientadas a la obtención de resultados confiables y coherentes con los objetivos a desarrollar. Por este motivo el trabajo contempló en primer lugar una revisión bibliográfica en la cual se recopilaron antecedentes nacionales e internacionales respecto a la fabricación de hormigones y propiedades de sus componentes y la aplicación de nanofibras de celulosa en hormigones y/o morteros y la influencia de este aditivo en su resistencia, hidratación y absorción capilar. Con esto se logró establecer la metodología experimental en la cual se basó el proyecto.

El diseño experimental quedó definido con la elaboración de probetas de hormigón incorporando concentraciones de nanofibras de celulosa al 0,05% y 0,1% respecto a la masa del cemento utilizando fibras de longitud corta y larga, además, de incorporar un patrón para tener una referencia frente a la variación de resultados. Durante la confección se midió la docilidad de las mezclas mediante el ensayo del cono de Abrams de acuerdo con la NCh1019 (Instituto de Normalización Nacional [INN], 2009) y luego llevadas a curado para ser ensayadas a compresión bajo la NCh1037 (INN, 2009) a edades de 7, 14 y 28 días. Además, se realizó una confección adicional con el fin de evaluar el efecto de las nanofibras de celulosa a larga edad, siendo las probetas ensayadas a compresión a edades de 28, 56 y 90 días. Obteniendo los resultados de la primera confección se realiza un análisis de estos para determinar la concentración y tamaño de fibra que presenta mejor desempeño para posterior verificar este resultado realizando otras dos confecciones realizando ensayo de compresión, *loss on ignition* y absorción capilar.

Finalmente, los resultados se analizaron y compararon con respecto a sus patrones, culminando el trabajo con el desarrollo de las conclusiones con respecto al comportamiento de las probetas de hormigón con adición de nanofibras de celulosa en cuanto a resistencia a compresión, grado de hidratación y absorción capilar.

1.5. Principales resultados

En función del trabajo experimental, se determinó que la incorporación de nanofibras de celulosa (NFC) recicladas influye de manera cuantificable en el comportamiento del hormigón, evidenciando que su mecanismo de acción principal es físico y no químico.

En estado fresco, las mezclas modificadas presentaron una reducción drástica en la docilidad (llegando a asentamientos nulos con dosis del 0,1%). Este fenómeno se atribuye a la alta capacidad de retención de agua y gran superficie específica de las fibras, lo cual dificultó severamente la consolidación y compactación de las probetas.

En estado endurecido, la evaluación termodinámica para estimar el grado de hidratación mediante pérdida por ignición (LOI) arrojó variaciones altamente variables y mayoritariamente negativas (alcanzando hasta un -8,1% respecto al hormigón patrón). Esto demuestra que las fibras retienen

fuertemente el agua de amasado libre y limitan localmente la formación de geles C-S-H, refutando la hipótesis de un curado interno químico constante.

Sin embargo, a pesar de este déficit químico, la mezcla con dosificación de NFC de tamaño grande (TG) al 0,05% logró incrementar empíricamente la resistencia a la compresión en hasta un 17,6% a los 28 días. Se establece que este aumento se debe a un robusto mecanismo de refuerzo físico-mecánico: las fibras dispersas actúan puentes microfisuras a microescala y disipando la energía de fractura, logrando sobreponerse a la falta de hidratación.

Finalmente, los ensayos de durabilidad mediante absorción capilar arrojaron resultados contrapuestos entre las distintas campañas (con reducciones de hasta 38% e incrementos de 38% en la sorptividad secundaria). Esto confirma que la capacidad de las NFC para densificar la red de poros finos no es un proceso autónomo, sino que depende críticamente de aplicar una alta energía de compactación que logre contrarrestar la severa pérdida de trabajabilidad inicial que genera el aditivo.

1.6. Organización de la memoria de título

Esta memoria se compone de cinco capítulos. El Capítulo 2 contiene las normativas vigentes requeridas para la elaboración de hormigón junto con el análisis de sus componentes, además, incluye una revisión del estado del arte sobre el uso de nanofibras de celulosa utilizadas en hormigones. También se incluye información respecto de las nanofibras de celulosa tales como, sus propiedades, obtención y su potencial para ser utilizadas en hormigones. El capítulo 3 se centra en el plan experimental, los materiales utilizados y los ensayos realizados a las probetas en laboratorio. El capítulo 4 refleja los resultados obtenidos de los ensayos realizados. Finalmente, el capítulo 5 aborda las conclusiones de la investigación.

CAPÍTULO 2: USO DE NANOFIBRAS DE CELULOSA EN MEZCLAS DE HORMIGÓN

2.1. Introducción

El continuo desarrollo de la infraestructura civil a nivel global ha posicionado al hormigón como el material de construcción más utilizado por el ser humano. Sin embargo, su producción y aplicación enfrentan importantes desafíos contemporáneos, siendo los principales el impacto ambiental asociado a la manufactura del cemento Portland y la necesidad imperativa de extender la vida útil de las estructuras mediante el control de su durabilidad. En este contexto, la nanotecnología ha emergido como una disciplina transformadora en la ciencia de los materiales cementicios, permitiendo la manipulación y mejora de la microestructura del hormigón a escalas previamente inalcanzables.

El presente capítulo establece el marco teórico fundamental que rige el comportamiento físico, químico y mecánico de las matrices cementicias, comenzando con una revisión detallada de los componentes del hormigón bajo el rigor de la normativa chilena vigente (NCh). Posteriormente, se introduce el concepto de las nanofibras de celulosa (NFC), un nanomaterial de origen renovable que, extraído a partir de procesos de reciclaje de sacos de cemento posconsumo, promueve la economía circular en la industria.

Finalmente, se presenta una revisión crítica y exhaustiva del estado del arte sobre la interacción de las NFC con la matriz cementicia. Se analiza en profundidad cómo estas nanofibras alteran la reología en estado fresco, optimizan el curado interno y el grado de hidratación (DOH), y modifican el desempeño mecánico y la durabilidad. Esta recopilación teórica constituye la base científica para justificar las dosificaciones, tamaños de fibra y metodologías que se abordarán en las fases experimentales de esta investigación.

2.2. Componentes del hormigón y normativa nacional

El hormigón se define como un material compuesto, multifásico y heterogéneo, que desarrolla sus propiedades de ingeniería a partir de la reacción química (hidratación) entre un aglomerante y el agua, formando una matriz rígida que encapsula un esqueleto granular compuesto por áridos de distinto

tamaño. En Chile, la formulación, diseño y especificación de estos componentes se encuentran estrictamente regulados por el Instituto Nacional de Normalización (INN), asegurando estándares de calidad, resistencia y durabilidad estructural.

De acuerdo con la norma NCh170 (INN, 2016), el hormigón se clasifica según su resistencia especificada a la compresión (por ejemplo, desde grados G05 hasta G60) y según sus requerimientos de durabilidad, los cuales están condicionados por el grado de exposición a agentes externos, tales como sulfatos, ciclos de hielo-deshielo o ambientes marinos ricos en cloruros.

2.2.1 Cemento

El cemento actúa como el agente cohesivo de la mezcla. Según la norma NCh148 (INN, 2021), se define como un material finamente pulverizado que, al combinarse con agua, forma una pasta conglomerante capaz de fraguar y endurecer tanto al aire como bajo el agua (fraguado hidráulico). Su componente esencial es el *clinker*, un producto obtenido de la calcinación a altas temperaturas de calizas y arcillas, que se compone fundamentalmente de silicatos tricálcicos (alita), silicatos dicálcicos (belita), aluminatos tricálcicos y ferroaluminatos tetracálcicos.

La hidratación de estos compuestos es una reacción altamente exotérmica. Los silicatos de calcio, al reaccionar con el agua, producen el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H), que es el principal responsable de la resistencia mecánica y la reducción de la porosidad en la matriz, además de liberar hidróxido de calcio (Portlandita) como subproducto (Scrivener y Nonat, 2011). La calidad del cemento utilizado en obras nacionales debe ser verificada mediante normas complementarias, tales como la NCh150 para determinar su finura, la NCh151 para la consistencia normal y la NCh152 para el tiempo de fraguado (INN, 2019).

2.2.2 Áridos finos y gruesos

Los áridos constituyen típicamente entre el 60% y el 75% del volumen total del hormigón, actuando como un esqueleto inerte que proporciona estabilidad dimensional, resistencia al desgaste y economía a la mezcla. La norma NCh163 (INN, 2024) establece los requisitos generales que deben cumplir estos materiales pétreos, exigiendo que sean partículas duras, estables, limpias y libres de sustancias

perjudiciales que puedan interferir con la hidratación del cemento o inducir la corrosión de las armaduras.

El adecuado desempeño de los áridos depende críticamente de su distribución granulométrica, evaluada mediante la NCh165 (INN, 2009), la cual busca lograr la máxima compacidad posible, minimizando los vacíos intergranulares que la pasta de cemento deberá rellenar. Asimismo, las normativas NCh1117 y NCh1239 (INN, 2010; INN, 2009) regulan la determinación de las densidades reales, netas y la absorción de agua de gravas y arenas, respectivamente. Este último parámetro es vital para el diseño de mezcla, ya que áridos con alta absorción pueden sustraer agua destinada a la hidratación del cemento si no se corrigen sus estados de humedad previo al amasado. Adicionalmente, el contenido de material fino (menor a 0.075 mm) está restringido por la NCh1223, dado que un exceso de finos incrementa exponencialmente la demanda de agua y debilita la zona de transición interfacial (ITZ) entre el árido y la pasta (Neville, 2011).

2.2.3 Agua de amasado

El agua desempeña un rol dual y fundamental en la tecnología del hormigón: por un lado, actúa como lubricante para facilitar la trabajabilidad y compactación de la mezcla en estado fresco; por otro, es el reactivo químico necesario para la hidratación de las fases del *clinker*. El uso de agua de amasado está regulado por la norma NCh1498 (INN, 2022).

La normativa permite el uso directo de agua potable suministrada por redes públicas. Sin embargo, en caso de utilizar fuentes alternativas o desconocidas, el agua debe someterse a análisis químicos rigurosos. Se establecen límites máximos permisibles para la concentración de sólidos disueltos, materia orgánica, sulfatos, álcalis y, de manera crítica, iones cloruro. La presencia excesiva de cloruros en el agua de amasado es una de las causas primarias de la despasivación temprana del acero de refuerzo, lo que desencadena procesos corrosivos desde el interior de la matriz estructural. El control estricto de la relación agua/cemento (a/c) es el factor macroscópico más determinante en la porosidad capilar final del hormigón endurecido; una relación a/c elevada genera una red de poros interconectados que facilita el transporte de agentes agresivos a largo plazo.

2.3. Nanofibras de celulosa (NFC)

La celulosa es el polímero orgánico más abundante en la biósfera, formando la base estructural de la pared celular en especies vegetales. Su estructura macromolecular está compuesta por cadenas lineales de monómeros de glucosa unidas por enlaces glucosídicos. En la naturaleza, la celulosa se encuentra jerárquicamente organizada: las cadenas moleculares forman microfibrillas, las cuales se agrupan en macrofibrillas, conformando finalmente la fibra celulósica visible que está unida por hemicelulosa y lignina (Mondal, 2017).

En los últimos años, la valorización de residuos de la industria de la construcción ha tomado relevancia. Los sacos de papel utilizados para la comercialización del cemento están fabricados con celulosa de alta calidad, específicamente pulpa Kraft de fibra larga. Mediante la aplicación de los principios de la economía circular, estos sacos posconsumo pueden ser reciclados y procesados para extraer nanomateriales de alto valor agregado, como las nanofibras de celulosa (Cifuentes, 2024; Aroca, 2025).

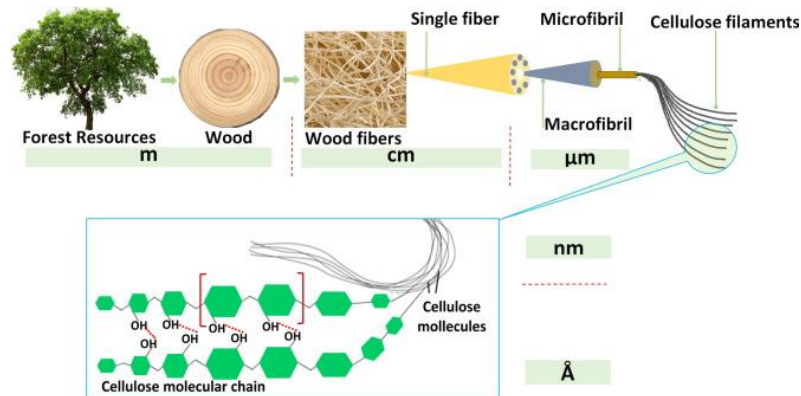


Figura 2.1 Estructura jerárquica de la celulosa

Fuente: Hisseine *et al.* (2019)

2.3.1 Clasificación de la nanocelulosa

Dependiendo de la severidad y el tipo de tratamiento de extracción (químico, enzimático o mecánico), se pueden obtener distintas morfologías de celulosa a nanoescala, siendo las principales (Withana et al., 2024):

- **Nanocristales de Celulosa (CNC):** Obtenidos típicamente mediante hidrólisis ácida severa, la cual disuelve las regiones amorfas de la celulosa, dejando únicamente cristales rígidos con forma de aguja. Poseen una baja relación de aspecto.
- **Nanofilamentos de Celulosa (CF):** Extraídos mediante procesos mecánicos suaves, mantienen un diámetro nanométrico, pero longitudes en la escala de cientos de micrómetros, siendo muy flexibles y tendiendo a formar redes.
- **Nanofibras de Celulosa (NFC):** Se obtienen mediante una combinación de tratamientos enzimáticos y refinación mecánica (homogeneización a alta presión). Las NFC logran un equilibrio morfológico: poseen diámetros nanométricos (típicamente entre 5 y 100 nm) y longitudes en la escala micrométrica. A diferencia de los CNC, las NFC conservan tanto las zonas cristalinas como las amorfas del polímero, lo que les confiere una extraordinaria flexibilidad, una alta relación de aspecto y la capacidad de formar redes tridimensionales entrelazadas.

2.3.2 Propiedades fisicoquímicas relevantes para matrices cementicias

La idoneidad de las NFC como aditivo en el hormigón radica en sus propiedades intrínsecas a nanoescala. Su elevada superficie específica expone una enorme cantidad de grupos hidroxilo (-OH) al medio circundante. Estos grupos son altamente polares, otorgando a las NFC una naturaleza fuertemente hidrofílica (Hisseine et al., 2018). Como resultado, las nanofibras de celulosa poseen una capacidad de absorción y retención de agua excepcional, pudiendo retener agua en cantidades que superan hasta 100 veces su propia masa. Esta agua queda ligada a la superficie de las fibras mediante enlaces de puente de hidrógeno, característica que se aprovechará fundamentalmente para los procesos de curado interno, como se detalla en las siguientes secciones.

2.4. Influencia de las NFC en matrices cementicias

La introducción de NFC en mezclas de hormigón y mortero produce una serie de alteraciones físicas y termodinámicas que modifican el comportamiento del material durante toda su vida útil. A diferencia de los aditivos químicos tradicionales que modifican la tensión superficial (como los plastificantes), o las adiciones minerales que poseen actividad puzolánica (como el humo de sílice), las NFC actúan a través de mecanismos puramente físicos y de transporte capilar a nanoescala.

2.4.1 Efecto sobre la reología y trabajabilidad

La incorporación de NFC impacta de manera inmediata y evidente el estado fresco del hormigón. La literatura científica es unánime al reportar que la adición de celulosa a nanoescala reduce drásticamente la docilidad, fluidez y trabajabilidad de las mezclas (Albornoz-Palma et al., 2020; Nasir et al., 2022).

Este fenómeno reológico está gobernado por dos mecanismos primarios. Primero, la extrema hidrofiliidad y la gran superficie específica de las NFC hacen que estas absorban rápidamente una fracción significativa del agua de amasado libre. Al secuestrar esta agua, se reduce el volumen de fluido disponible para lubricar las partículas de cemento y los áridos, incrementando la fricción interna de la mezcla. Segundo, debido a su alta relación de aspecto y flexibilidad, las NFC tienden a formar una red tridimensional o "andamiaje" dentro de la pasta fresca. Esta red interconectada incrementa exponencialmente la viscosidad plástica y el esfuerzo de fluencia (yield stress) del hormigón.

Ensayos empíricos, como el cono de Abrams (NCh1019), demuestran que, al superar concentraciones del 0,1% de NFC respecto al peso del cemento, el asentamiento de la mezcla puede llegar a ser nulo (Aroca, 2025). Esta pérdida de fluidez representa un desafío tecnológico en obra, ya que dificulta la correcta compactación del hormigón. Para mitigar este efecto adverso en dosificaciones altas, resulta mandatorio el uso de aditivos superplastificantes de alto rango o la aplicación de una mayor energía de vibrado prolongada, con el fin de evitar la formación de nidos de abeja (oquedades) que comprometerían la integridad estructural.

2.4.2 Dinámica de hidratación, nucleación y curado interno (DOH)

Uno de los descubrimientos más trascendentales en el uso de nanomateriales es el rol de las NFC como un avanzado agente de curado interno. En el hormigón de alto desempeño o con bajas relaciones a/c , la rápida hidratación consume el agua capilar disponible, generando una caída en la humedad relativa interna de la matriz. Esto provoca una autodesecación que induce tensiones de contracción capilar, resultando invariablemente en contracción autógena y fisuración a edades muy tempranas, lo cual abre vías directas para la entrada de agentes corrosivos.

Las NFC abordan este problema mediante un mecanismo dual (Bentz, 2007; Hisseine et al., 2019):

- **Nucleación Física:** Debido a su escala nanométrica, las fibras se dispersan en los espacios intersticiales entre los granos de cemento. Su superficie actúa como un "molde" o sitio preferencial de nucleación térmica, reduciendo la barrera de energía de activación necesaria para que los iones disueltos precipiten. Esto acelera la tasa de formación temprana del gel C-S-H alrededor de las fibras.
- **Difusión de Cortocircuito (Short-Circuit Diffusion):** A medida que la matriz cementicia comienza a endurecer y la humedad relativa interna decae, se genera un gradiente de presión capilar. Las NFC, que previamente absorbieron agua durante el mezclado, responden a este gradiente liberando gradualmente el agua retenida. A diferencia de los agregados livianos porosos tradicionales utilizados para curado interno, las NFC logran adherirse íntimamente a los granos de cemento no hidratados. El agua viaja a través de las propias nanofibras (actuando como canales capilares) superando la barrera de los geles de hidratación ya formados, logrando reaccionar con el núcleo anhidro del cemento.

2.4.3 Nanofibras de celulosa obtenidas del reciclaje de sacos de cemento

Para fines de esta investigación, el estudio se desarrolla con una mirada en la economía circular y sustentabilidad en la construcción, buscando la valorización de residuos industriales utilizados en las mismas obras como son los sacos de cemento que son tratados para la obtención de las nanofibras lignocelulósicas, en concordancia con la Ley de Responsabilidad Extendida del Productor.

El método de obtención de las NFC a partir del reciclaje de sacos de cemento se realiza bajo el método realizado en la Universidad de Concepción el cual es explicado por Cifuentes (2024).

Mediante las etapas de producción, se obtuvieron lotes de NFC con diversas características morfológicas, las cuales son de importancia para el diseño experimental. Los resultados de la caracterización de las NFC se presentan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 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 homogenización	20	5.01	240

La diferencia entre ambas muestras se traduce en que la NFC 1 de tamaño grande presenta un mayor diámetro por lo que su función predomina en actuar como un filler fibroso, aportando a la estabilidad volumétrica y al control de la pérdida de agua por exudación. Por otro lado, la NFC 3 de tamaño pequeño presenta dimensiones más cercanas a la escala nanométrica, con mayor relación aspecto. La función de esta nanofibra de tamaño pequeño principalmente se da como un agente de curado interno por su alta capacidad hidrofílica.

Con esta diferencia de tamaños de nanofibra se plantea el estudio de mezclas de hormigón incorporando nanofibras de ambos tamaños por separado en distintas concentraciones con respecto a la masa de cemento. Con el objetivo de determinar que concentración y tamaño maximiza las propiedades como resistencia mecánica, curado interno y durabilidad del hormigón.

2.4.4 Síntesis interpretativa

En síntesis, el estado del arte muestra una coherencia significativa entre los estudios nacionales y la literatura internacional. La Tabla 2.2 resume tres estudios realizados por otros autores, donde se observa que el uso de NFC en mezclas cementicias presenta beneficios claros cuando se emplean dosis bajas, particularmente en el rango de 0,05–0,1 %, obteniendo mejoras en resistencia, hidratación y comportamiento higroscópico. Las fibras grandes tienden a mejorar la resistencia mecánica debido a su mayor capacidad de puenteo, mientras que las fibras pequeñas favorecen el curado interno y el mantenimiento de humedad, potenciando la hidratación del cemento. Si bien la trabajabilidad se ve afectada, este inconveniente puede manejarse mediante ajustes en el diseño de mezcla. En conjunto, estas evidencias respaldan la potencialidad de las NFC como un aditivo sostenible y eficiente para mejorar el desempeño del hormigón en aplicaciones donde la resistencia, la hidratación y el control de humedad son factores críticos.

Tabla 2.2 Síntesis estudios sobre nanofibras de celulosa

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%	Influencia de nanofibras de celulosa en el curado interno y resistencia en morteros.	Incremento de la resistencia inicial de los morteros y un grado de hidratación mayor al patrón.
Aroca (2025)	NFC recicladas de sacos de cemento en tres tamaños	0.1%-0.2%	Evaluación de durabilidad, resistencia, humedad, curado y docilidad.	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 tamaños distintos	0.05%-0.1%	Corrosión acelerada, durabilidad en ambiente marino, resistencia mecánica.	La incorporación de nanofibras de celulosa al 0,05%, especialmente de menor tamaño, mejora la resistencia a la compresión del hormigón y retrasa significativamente la aparición de fisuras bajo corrosión acelerada

2.5. Conclusiones

La evidencia científica contemporánea confirma que las nanofibras de celulosa constituyen un avance biotecnológico fundamental para la ingeniería de materiales cementicios. Su aplicación trasciende la mera modificación reológica, actuando dinámicamente a nanoescala como reservorios de curado interno y plantillas de nucleación que optimizan la hidratación del cemento (DOH). Las mejoras en la densificación microestructural se traducen en un refuerzo tangible del comportamiento mecánico a compresión y flexión, mitigando la contracción autógena temprana.

Más importante aún, el refinamiento de la red de poros capilares inducido por las NFC confiere a la matriz una resistencia excepcional contra la penetración de agentes agresivos, posicionándose como una estrategia viable para la prevención de la corrosión del acero de refuerzo en ambientes marinos o salinos. No obstante, el impacto adverso sobre la trabajabilidad en estado fresco y el peligro inminente de floculación (aglomeración) limitan su viabilidad a concentraciones estrictas.

Toda esta fundamentación teórica permite concluir, de manera categórica, que la investigación experimental debe restringirse a dosificaciones de baja concentración, fijando como límites de evaluación el 0,05% y el 0,1% con relación al peso del material cementante. Asimismo, la revisión teórica sobre la morfología de la fibra justifica la decisión de evaluar y contrastar el desempeño entre nanofibras de tamaño grande y tamaño pequeño, con el fin de determinar el equilibrio óptimo entre el

aumento de la resistencia mecánica y la maximización de la durabilidad estructural en el contexto normativo y constructivo chileno.

CAPÍTULO 3: METODOLOGIA

3.1. Introducción

El presente capítulo describe de manera exhaustiva el diseño, la justificación y los protocolos experimentales aplicados para evaluar la influencia de la incorporación de nanofibras de celulosa (NFC) en matrices de hormigón. El desarrollo de nuevos materiales cementicios dopados con nanotecnología exige un control riguroso de las variables de dosificación, mezclado y curado, dado que las interacciones a escala nanométrica determinan el desempeño macroscópico de la estructura.

Se detalla la caracterización física y química de los materiales constituyentes, la formulación de la mezcla de control y las mezclas modificadas. Posteriormente, se describen los ensayos normalizados ejecutados en estado fresco y endurecido, introduciendo mediciones de sorptividad capilar y análisis termogravimétrico para cuantificar el grado de hidratación. Finalmente, se establece un criterio de optimización secuencial que permitirán determinar la combinación óptima de tamaño y concentración de nanofibra, garantizando la validez, reproducibilidad y significancia estadística de los resultados obtenidos.

3.2. Mezcla patrón y valores objetivos

Para evaluar el desempeño del nanomaterial, se diseñó una mezcla de hormigón de referencia (patrón) basada en una dosificación en masa de 1: 1,8: 2,3: 0,5 (Cemento: Arena: Grava: Agua). Esta proporción responde a un diseño volumétrico estructurado mediante el método del ACI 211.1 (American Concrete Institute, 2022).

El objetivo de este diseño fue obtener un hormigón estructural de grado G30, definido como aquel capaz de alcanzar una resistencia especificada a la compresión de 30 MPa a los 28 días, siendo este un estándar representativo de la construcción de infraestructura civil en Chile bajo la norma NCh170 (Instituto Nacional de Normalización [INN], 2016). Asimismo, se estableció como valor objetivo una "trabajabilidad adecuada", la cual se define reológicamente como una consistencia plástica que permita la correcta compactación manual o por vibrado mecánico sin inducir segregación ni exudación. En términos empíricos, este valor objetivo se fijó en un asentamiento de cono de Abrams

entre 5 a 7 cm. La relación agua/cemento (a/c) de 0,5 garantiza el agua estequiométrica necesaria para la hidratación completa del cemento ($\sim 0,23$ g/g) y el agua de lubricación requerida para alcanzar la docilidad objetivo en el hormigón patrón, creando una matriz capilar estable sobre la cual medir las perturbaciones inducidas por las NFC.

3.3. Porcentajes y tamaños de adición de NFC

Las variables independientes del estudio corresponden a la concentración de NFC y a su morfología. Se determinó utilizar adiciones de 0,05% y 0,1% respecto a la masa del material cementante. La selección de estos porcentajes restrictivos se fundamenta en la literatura científica reciente (Onuaguluchi y Banthia, 2016; Aroca, 2025; Cifuentes, 2024), la cual demuestra de manera concluyente que la adición de celulosa a nanoescala presenta un umbral de percolación crítico. Superar el 0,2% de concentración induce una severa floculación (aglomeración de fibras por puentes de hidrógeno) que atrapa aire, reduce drásticamente la resistencia mecánica y genera un esfuerzo de fluencia (*yield stress*) que vuelve a la mezcla inmanejable en estado fresco. Por consiguiente, los valores de 0,05% y 0,1% buscan el punto de equilibrio termodinámico donde se maximiza la dispersión de las fibras, optimizando el puenteo de microfisuras y el curado interno, sin penalizar de forma crítica la reología.

En cuanto a la morfología, se emplearon dos distribuciones de tamaño: Tamaño Grande (TG) y Tamaño Pequeño (TP). Esta decisión metodológica busca contrastar dos mecanismos de acción a nivel microestructural: la capacidad de las fibras grandes para transferir tensiones a través de poros, frente a la capacidad de las fibras pequeñas para insertarse en la microporosidad capilar (intersticios de los geles C-S-H), promoviendo una densificación más íntima de la matriz.

3.4. Caracterización de las materias primas

La reproducibilidad de un estudio en ciencia de materiales exige la caracterización de sus constituyentes, asegurando que cumplan con la normativa vigente

3.4.1 Cemento

El aglomerante utilizado fue Cemento Portland Puzolánico, clasificado como grado corriente, adquirido en el comercio nacional (Cemento Bío Bío Especial). Este material fue seleccionado por su amplio uso en la industria nacional y su cumplimiento de las exigencias físicas y químicas de la norma NCh148 (INN, 2021). La figura 3.1 corresponde al cemento utilizado para las confecciones realizadas.



Figura 3.1 Cemento Bio Bio utilizado para la confección de hormigón

3.4.2 Áridos

Los agregados pétreos actúan como el esqueleto inerte que soporta las cargas volumétricas del hormigón. Se emplearon áridos de origen natural fluvial (Arenas Costanera Bío Bío).

- **Árido Fino:** Arena natural, la cual fue sometida a análisis granulométrico según NCh165 (INN, 2009a). Se determinó su densidad real, neta y absorción de agua de acuerdo con la norma NCh1117 (INN, 2010). Conocer la absorción exacta del árido fino es imperativo para calcular el agua libre de la mezcla y evitar que la arena compita por el agua con las nanofibras.
- **Árido Grueso:** Gravilla de tamaño máximo nominal de 3/4" (19 mm). Su caracterización física y granulométrica se rigió por la norma NCh163 (INN, 2024).

Previo a cada amasada, se determinó el contenido de humedad natural de los áridos mediante secado en coccinilla, ajustando matemáticamente el agua de dosificación para mantener inalterada la relación a/c efectiva.



Figura 3.2 Árido grueso y fino empleado en la confección de hormigón.

3.4.3 Agua de amasado

Se empleó agua potable extraída directamente de la red de suministro público, la cual cumple íntegramente con los requisitos de la norma NCh1498 (INN, 2022) respecto a la ausencia de materia orgánica, cloruros y sulfatos disueltos que pudiesen interferir con las reacciones de fraguado o iniciar procesos de despasivación temprana.

3.4.4 Nanofibras de celulosa

Las nanofibras de celulosa (NFC) utilizadas fueron producidas por el Laboratorio de Productos Forestales (LPF) del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Concepción, empleando un proceso enzimático mecánico de desfibrilación a partir de pulpa de papel de sacos de cemento posconsumo. Este procedimiento es el descrito por Cifuentes (2024) y Aroca (2025) donde se observan etapas de limpieza, desfibrilado, refinación y homogenización a alta presión. De este proceso de obtención de nanofibras se destacan dos morfologías como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Características de nanofibras de celulosa utilizadas

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 homogenización	20	5.01	240

Las nanofibras de celulosa fueron empleadas en las siguientes dosificaciones: NFC TG 0,1%, NFC TG 0,05%, NFC TP 0,1% y NFC TP 0,05%, el porcentaje haciendo alusión a la masa de cemento.

3.5. Diseño de mezclas, nomenclatura.

El diseño se elaboró con el fin de evaluar la influencia de la adición de nanofibras de celulosa en las propiedades del hormigón. Se utilizó una relación agua cemento constante de 0,5 para todas las confecciones realizadas definidas por confecciones previas en el laboratorio de hormigones de la Universidad de Concepción.

Se diseñaron un máximo de cinco tipos de mezclas, siendo estas el Patrón sin NFC incorporadas y cuatro con adición de NFC en distintos tamaños y proporciones respecto a la masa del cemento.

Se definió la siguiente nomenclatura para la identificación de las mezclas en las dosificaciones.

$$A - NFC - X - C$$

Donde:

- A: Adición.
- NFC: Nanofibra de celulosa
- X: Nanofibra tamaño grande (TG) o Nanofibra tamaño pequeño (TP).
- C: Porcentaje de adición nanofibra de celulosa.

Por ejemplo, A-NFC-TG-0,05% quiere decir que la mezcla corresponde a la adición de nanofibra de celulosa en tamaño grande en concentración del 0,05% con respecto a la masa de cemento.

3.6. Dosificación y preparación de las mezclas

La dosificación de 1: 1,8: 2,3: 0,5 se ajustó volumétricamente para confeccionar amasadas de 6 probetas cilíndricas de 15x30 cm y dicha dosificación con el fin de cumplir los objetivos propuestos en la sección 3.2.

En la Tabla 3.2 se presentan las proporciones base de los materiales utilizados para las distintas mezclas utilizadas.

Tabla 3.2 Dosificación de materiales

Mezcla	Patrón	A-NFC-TG-0.05%	A-NFC-TG-0.1%	A-NFC-TP-0.05%	A-NFC-TP-0.1%
Cemento [kg]	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6
Arena [kg]	28,4	28,4	28,4	28,4	28,4
Agua [kg]	7,75	7,3	6,85	7,2	6,6
Gravilla	36,3	36,3	36,3	36,3	36,3
Nano fibra TG	-	0,45	0,9	-	-
Nano fibra TP	-	-	-	0,55	1,20
R A/C	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50

3.7. Trabajo experimental

El desarrollo del trabajo experimental se llevó a cabo en cinco etapas de confección, confecciones que fueron sometidas a distintas edades de ensayo y ensayos los cuales se muestran a continuación.

Tabla 3.3 Programa experimental de confección y ensayos de las mezclas de hormigón

Confección	Mezclas elaboradas	Ensayos realizados	Edades de ensayo
1 ^a confección	Patrón A-NFC-TG-0.05% A-NFC-TG-0.1% A-NFC-TP-0.05% A-NFC-TP-0.1%	Cono de Abrams Compresión LOI	7, 14, 28 días
2 ^a confección	Patrón A-NFC-TG-0.05% A-NFC-TP-0.05%	Cono de Abrams Compresión LOI	28, 56, 90 días
3 ^a confección	Patrón A-NFC-TG-0.05% A-NFC-TG-0.1% A-NFC-TP-0,05%	Cono de Abrams Compresión LOI	7, 14, 28 días
4 ^a confección	Patrón A-NFC-TG-0.05%	Cono de Abrams Compresión Absorción capilar	7, 28 días
5 ^a confección	Patrón A-NFC-TG-0.05%	Cono de Abrams Compresión Absorción capilar	7, 28 días

(*) LOI: *Loss on Ignition*.

El trabajo experimental permitió evaluar el comportamiento que adopta el hormigón con la presencia de nanofibras de celulosa en su microestructura ya sea en estado fresco como endurecido. Los resultados obtenidos se muestran y analizan en el siguiente capítulo, abordando los ensayos proyectados con anterioridad en esta sección.

3.8. Métodos de ensayo en estado fresco

Inmediatamente después de concluido el mezclado, se procedió a la caracterización reológica de la mezcla.

3.8.1 Determinación de la docilidad (Cono de Abrams)

La trabajabilidad se evaluó mediante el ensayo de asentamiento del Cono de Abrams, siguiendo los lineamientos de la norma NCh1019 (INN, 2009b). Este ensayo es fundamental para registrar la pérdida de fluidez inducida por la absorción de agua de las NFC y el aumento de la viscosidad plástica generado por el entrelazamiento físico de las nanofibras. El equipo consistió en un molde troncocónico metálico estándar, llenado en tres capas compactadas con 25 golpes de varilla pisón. El descenso de la masa de hormigón se midió con precisión milimétrica. Se documentaron las diferencias de asentamiento entre el patrón y las mezclas con adición. La figura 3.3 muestra la ejecución del ensayo del cono de Abrams a una de las mezclas preparadas.



Figura 3.3 Ejecución del ensayo del cono de Abrams

Este ensayo se realizó en todas las coladas confeccionadas.

3.8.2 Moldeo y curado de probetas

Una vez finalizado el control en estado fresco, se procedió a la confección de las probetas para los ensayos en estado endurecido. Se emplearon moldes cilíndricos estandarizados de 150 mm de diámetro por 300 mm de altura. El llenado se realizó en dos capas. La compactación se efectuó utilizando un vibrador de inmersión de aguja. La aguja se insertó verticalmente en el centro de cada capa durante 10 a 15 segundos, asegurando la eliminación de vacíos atrapados sin inducir segregación de la lechada superficial. Las probetas fueron cubiertas con láminas plásticas para evitar la pérdida prematura de humedad por evaporación.

A las 48 horas, se procedió al desmolde. Posteriormente, las probetas se introdujeron en la cámara de curado húmedo del laboratorio (Temperatura controlada a 20 ± 2 °C y Humedad Relativa > 95%), conforme a la NCh1017 (INN, 2009c), donde permanecieron inalteradas hasta alcanzar sus respectivas edades de ensayo.

3.9. Métodos de ensayo en estado endurecido

Para dar respuesta integral a los objetivos se estructuró una batería de tres ensayos fundamentales: análisis mecánico, análisis de red porosa (sorptividad) y pérdida por ignición (*Loss on Ignition*, LOI por sus siglas en inglés).

3.9.1 Ensayo de resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es el principal parámetro de diseño estructural. El ensayo se ejecutó rigiéndose estrictamente por las disposiciones de la norma NCh1037 (INN, 2009d). A las edades de correspondientes de ensayo, las probetas cilíndricas fueron retiradas de la cámara húmeda. Previo al ensayo, se midieron sus dimensiones reales (diámetro y altura promedio) y se determinó su masa para registrar la densidad aparente del hormigón endurecido. La cara de aplicación de carga fue refrentada para garantizar la coplanaridad y distribución uniforme de los esfuerzos.



Figura 3.4 Ensayo a compresión en probetas cilíndricas de hormigón

3.9.2 Ensayo de pérdida de masa por ignición (LOI)

La evaluación de la influencia de las NFC en el curado interno requiere cuantificar qué porcentaje del cemento reaccionó efectivamente. Para ello, se empleó el método de Pérdida por Calcinación (Loss On Ignition, LOI), que permite aislar el agua químicamente ligada a los geles de hidratación (Espinoza Hijazin, 2010).

Procedimiento experimental:

1. **Molienda:** Se extrajeron fragmentos pulverizados del núcleo interno de las probetas ensayadas a las edades correspondientes de 7, 14, 28, 56 y 90 dependiendo del caso.
2. **Secado de agua evaporable (105 °C):** Muestras de aproximadamente 15 gramos de este polvo se colocaron en crisoles de porcelana previamente tarados. Se introdujeron en una estufa a 105 ± 5 °C durante 24 horas. Esta temperatura elimina el agua capilar libre y el agua adsorbida físicamente.
3. **Enfriamiento controlado:** Para evitar la reabsorción de humedad ambiental (que alteraría el peso seco), las muestras fueron extraídas del horno e inmediatamente introducidas en un desecador (Humedad Relativa ~0%) hasta que alcanzaron la temperatura ambiente. Una vez frías, se registró su masa seca.

4. **Calcinación de agua químicamente unida (1000 °C):** Posteriormente, los crisoles se introdujeron en una mufla de alta temperatura. La temperatura se elevó gradualmente hasta alcanzar los 1000 ± 50 °C, manteniéndose este régimen térmico constante por 4 horas.
 - Curva de descomposición térmica: Entre los 105°C y 600°C, ocurre la deshidratación principal de los geles de silicato de calcio hidratado (C-S-H) y la descomposición de la Portlandita (CH) en óxido de calcio y agua. Entre los 700°C y 900°C se produce la descarbonatación del carbonato de calcio resultante de la carbonatación natural de la muestra. Alcanzar los 1000°C asegura la descomposición completa de todas las fases hidratadas y la volatilización de cualquier resto orgánico (incluyendo las propias nanofibras).
5. Las muestras se enfriaron nuevamente en el desecador y se registró su masa final calcinada.

Una vez preparado el polvo de hormigón, se pesaron aproximadamente 2 a 5 g de una muestra en crisoles cerámicos previamente tarados. Las muestras fueron introducidas en una mufla y sometidas a un régimen térmico controlado, elevando la temperatura hasta 1000 ± 50 °C, la cual se mantuvo durante un periodo mínimo de 4 horas para asegurar la descomposición de los compuestos volátiles y la liberación del agua químicamente ligada. El tiempo de permanencia en la mufla se ajustó en función del tamaño de la muestra, manteniéndose las muestras overnight, con un tiempo aproximado de 10 horas, hasta asegurar la completa calcinación del material.

La pérdida por ignición se determina a partir de la diferencia de masa de la muestra seca a 105°C y la muestra calcinada a 1000°C, expresándose como un porcentaje de la masa inicial.

$$LOI(\%) = \frac{m_{105} - m_{1000}}{m_{105}} \times 100$$

Fórmula 1 Pérdida por ignición

Donde:

- m_{105} corresponde a la masa de muestra seca a 105°C
- m_{1000} corresponde a la masa residual después de la ignición.

Cálculo del grado de hidratación (DOH):

A partir de los valores obtenidos de pérdida por ignición (LOI), se estimó el grado de hidratación del cemento (DOH), que se calcula relacionando esta agua no evaporable con la cantidad de agua necesaria para hidratar teóricamente el 100% del cemento. Según la química del cemento Portland (Neville, 2012; Bentz, 2007), la hidratación completa requiere aproximadamente 0,23 gramos de agua químicamente ligada por cada gramo de cemento anhidro.

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

Fórmula 2 Grado de hidratación del cemento

Los valores de LOI permiten comparar el contenido de agua ligada entre las distintas mezclas, asumiendo que mayores valores de pérdida por ignición están asociados a un mayor grado de hidratación del cemento y a una mayor retención de humedad interna. Mientras que el grado de hidratación permite expresar de forma directa el porcentaje de cemento que ha reaccionado en el material, constituyéndose como un indicador más claro y comparable del desempeño del hormigón. En consecuencia, si bien el ensayo ejecutado experimentalmente corresponde a la determinación de la pérdida por ignición, la discusión de resultados se presenta en función del DOH, ya que este parámetro sintetiza el avance efectivo de la hidratación y facilita el análisis de la influencia de las nanofibras de celulosa en el desarrollo microestructural del material.

Este criterio es consistente con el mecanismo de curado interno atribuido a las nanofibras de celulosa, el cual promueve una hidratación más prolongada y una microestructura más densa del hormigón. Para asegurar la reproducibilidad de los resultados, el ensayo se realizó en al menos dos muestras por mezcla, considerando el valor promedio como representativo.

3.9.3 Absorción capilar

La absorción capilar se empleó como un indicador del grado de permeabilidad y compactación del hormigón endurecido, así como de la eficiencia del curado interno proporcionado por la incorporación

de nanofibras de celulosa (NFC). Este parámetro permite evaluar indirectamente la conectividad del sistema poroso y su influencia en la durabilidad del material frente al ingreso de agentes agresivos.

El procedimiento experimental se basó en los lineamientos propuestos por Taus (2003) y en la norma ASTM C1585 – Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes, incorporando adecuaciones asociadas a las condiciones de laboratorio y a la geometría de las probetas utilizadas. Para cada tipo de confección o colada se emplearon dos probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, elaboradas conforme al contexto nacional. De manera complementaria, se realizó un control de resistencia a compresión a edades de 7 y 28 días, con el objetivo de verificar la correcta fabricación y homogeneidad de las probetas.

Luego de 28 días de curado en cámara húmeda, bajo condiciones controladas de 20 ± 2 °C y humedad relativa superior al 95 %, cada cilindro fue cortado transversalmente mediante sierra diamantada refrigerada por agua, obteniéndose discos de $15 \text{ cm} \pm 5 \text{ mm}$ de espesor. A partir de cada cilindro se generaron dos especímenes de ensayo, correspondientes a la zona inferior y superior del molde original, con el propósito de analizar posibles diferencias asociadas a efectos de segregación o compactación durante el llenado.

Posteriormente, las caras de los discos fueron rectificadas para asegurar superficies planas, paralelas y libres de irregularidades, condición necesaria para garantizar un contacto uniforme con el agua durante el ensayo y asegurar la precisión de las mediciones gravimétricas. A continuación, las probetas fueron secadas en horno a 65 ± 3 °C durante un periodo de tres días, y posteriormente estabilizadas a temperatura ambiente durante una hora.

Una vez completado el secado, se procedió al sellado de las probetas mediante parafina sólida fundida, aplicada por calentamiento lento e indirecto mediante baño María. El sellado se realizó sobre superficies secas y limpias, impermeabilizando todas las caras excepto aquella destinada a la exposición al agua. En el caso de las probetas obtenidas de la parte inferior del cilindro, se dejó libre la cara que estuvo en contacto con el molde original, mientras que en las probetas superiores se expuso la cara correspondiente al llenado del cilindro. Este procedimiento permitió asegurar un flujo de agua unidireccional, evitando filtraciones laterales y evaporación superficial, en concordancia con los requerimientos establecidos en la ASTM C1585-20.

El uso de parafina sólida fundida como agente impermeabilizante se encuentra ampliamente respaldado en el ámbito de la ingeniería de materiales, destacándose su efectividad para generar una barrera hidrostática continua y rápida. En este contexto, la norma AASHTO T 275 reconoce su aplicación para el sellado completo de probetas, validando su utilización como método confiable de impermeabilización superficial.

Previo al inicio del ensayo, se realizó un control gravimétrico en tres etapas, registrándose la masa original de la probeta al término del curado, la masa seca posterior al secado en horno y la masa final luego del sellado con parafina. Esta última correspondió a la masa inicial de referencia.

Una vez determinada la masa base, las probetas fueron colocadas sobre una rejilla metálica nivelada dentro de un recipiente con agua a temperatura ambiente, asegurando un nivel de inmersión de 2 a 3 cm sobre la cara expuesta. El inicio del ensayo se definió en el instante de contacto entre la probeta y el agua ($t = 0$). A partir de este momento, se efectuaron mediciones gravimétricas en intervalos de tiempo progresivos, que abarcaron desde los primeros minutos hasta tiempos prolongados, permitiendo caracterizar el comportamiento de absorción a corto y largo plazo.

En cada intervalo de medición, la probeta fue retirada cuidadosamente del agua, secada superficialmente con toalla de papel para eliminar el exceso de humedad, pesada en balanza de precisión y devuelta al recipiente en un tiempo máximo de 15 segundos, con el fin de minimizar pérdidas de humedad por evaporación. Durante el desarrollo del ensayo se verificó diariamente el nivel del agua y la estabilidad del sistema de soporte.

El cálculo de la absorción acumulada se realizó conforme a la formulación establecida en la ASTM C1585-20, manteniendo su expresión original, con un enfoque orientado a la determinación de la sorptividad secundaria. La absorción capilar acumulada se determinó mediante la siguiente expresión:

$$I = \frac{m_t - m_0}{a \cdot d}$$

Formula 3 Absorción capilar acumulada

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 (0.001 g/mm^3).

Este procedimiento permitió evaluar comparativamente el comportamiento capilar del hormigón patrón y de las mezclas con adición de nanofibras de celulosa, estableciendo una relación directa entre el transporte de agua, el grado de compactación de la matriz y la eficiencia del curado interno inducido por las NFC.

En la siguiente figura se muestra el montaje realizado para llevar a cabo el ensayo.



Figura 3.5 Montaje de ensayo de absorción capilar

3.10. Criterio de selección de mezcla optima

Para determinar la dosificación y morfología de nanofibra más eficiente, no se utilizó un indicador único ponderado, sino un criterio de optimización secuencial. Dado que la función primordial del hormigón es el soporte de cargas, la variable directriz para la selección fue la resistencia a la compresión a los 28 días. Aquella combinación que logró maximizar esta propiedad sin comprometer

drásticamente la trabajabilidad (NFC-TG al 0,05%) fue definida como la mezcla óptima. Posteriormente, las variables de sorptividad capilar y pérdida por ignición (LOI) no se utilizaron como filtros de exclusión, sino como parámetros de validación física y termodinámica para explicar los mecanismos de densificación, transporte de fluidos y curado interno en la matriz cementicia de dicha mezcla óptima.

3.11. Conclusiones

La metodología experimental desarrollada en este estudio permitió establecer un procedimiento sistemático, reproducible y coherente con los objetivos planteados para evaluar la influencia de nanofibras de celulosa en el comportamiento del hormigón. La selección de materiales, las dosificaciones definidas y los métodos de ensayo empleados se ajustan a normativas nacionales vigentes y a referencias internacionales ampliamente aceptadas, asegurando la validez técnica de los resultados obtenidos.

El diseño experimental contempló adecuadamente la comparación entre un hormigón patrón y mezclas modificadas con nanofibras de celulosa de distinto tamaño y dosificación, lo que permitió aislar el efecto de estas adiciones sobre propiedades relevantes tanto en estado fresco como endurecido. La aplicación de ensayos normalizados de consistencia, resistencia a compresión, pérdida por ignición y absorción capilar proporcionó una base experimental sólida para analizar el comportamiento mecánico, el grado de hidratación y la durabilidad del material.

La metodología empleada para la determinación de la pérdida por ignición y el posterior cálculo del grado de hidratación permitió evaluar de manera indirecta el efecto de curado interno inducido por las nanofibras de celulosa, estableciendo un vínculo directo entre la evolución de la hidratación del cemento y el desempeño del hormigón endurecido. Asimismo, el ensayo de absorción capilar se definió como una herramienta adecuada para analizar la permeabilidad y compactación de la matriz cementicia, complementando la evaluación del comportamiento mecánico.

En conjunto, la metodología definida constituye una base experimental robusta y consistente, que permite abordar de manera integral el análisis del efecto de las nanofibras de celulosa en el hormigón y sustentar adecuadamente la interpretación de los resultados presentados en los capítulos posteriores.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Introducción

En este capítulo se da a conocer los resultados y análisis de los ensayos experimentales realizados en función del Capítulo 3, con el fin de evaluar la influencia de la nanofibra de celulosa (NFC) reciclada de sacos de cemento en las propiedades del hormigón. Los resultados se muestran de manera secuencial tal cual fue realizado durante el proyecto, comenzando con la caracterización de los áridos (arena y grava), trabajabilidad de cada mezcla realizada, resultados de resistencia a compresión a las distintas edades de ensayo, pérdida por ignición (LOI) y finalmente absorción capilar.

El análisis de los resultados se da bajo un enfoque teórico, interpretativo y experimental con el fin de entender la influencia de la NFC en forma pura que tiene sobre las confecciones realizadas con la presencia de esta frente a un patrón sin adición.

4.2. Resultados de áridos

4.2.1 Densidad y absorción de los áridos

La caracterización física de los áridos, específicamente, densidades reales y netas y absorción de agua se realiza según estipula la normativa chilena, NCh1239 y NCh 1117 para arenas y gravas respectivamente, con el objetivo de cumplir los estándares de calidad de los materiales que se utilizan para la confección de hormigón. El estudio de los áridos se realizó en dos fechas siendo estas las de obtención en grandes cantidades de material — 16 de abril y 26 de junio de 2025— y se presentan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Densidades y absorción de agua de los áridos

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

Estos valores quieren decir que existe una variación menor al 1% en las densidades reales lo cual se traduce en una uniformidad del material y controlado de manera adecuada frente a la humedad durante el periodo de acopio. En cuanto a la absorción de agua, se observa que todos los valores se encuentran dentro del límite permitido por la NCh 163 (INN 2024) lo que indica una porosidad adecuada de los áridos y conlleva a mejores resultados.

4.2.2 Análisis granulométrico

El procedimiento para realizar el análisis granulométrico de los áridos se hace siguiendo los pasos de la NCh 165 Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría. Los resultados obtenidos se grafican y se compara ante la banda granulométrica la cual muestra los límites establecidos en la NCh 165, verificando que tanto la arena y grava se encuentren dentro de esta banda resultando así ser un material adecuado para su uso en la confección de hormigón.

Las Figuras 4.1 a 4.3 presentan los resultados graficados de la granulometría, mostrando las curvas obtenidas para los ensayos del 16 de abril y 26 de junio, separando entre árido fino y grueso.

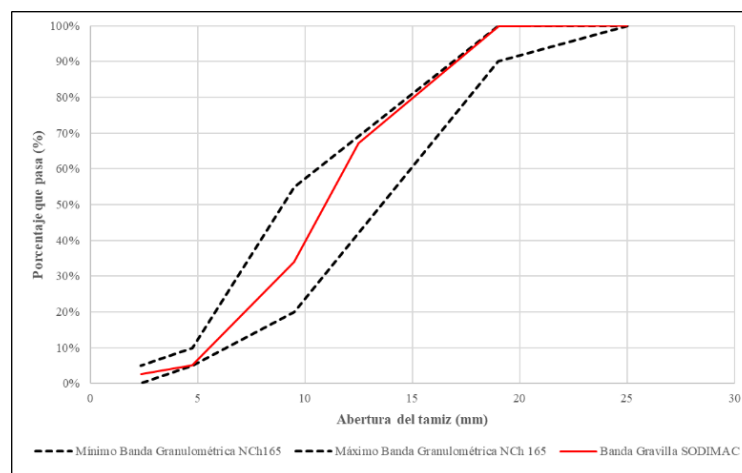


Figura 4.1 Curva granulométrica de árido grueso 16/04/2025

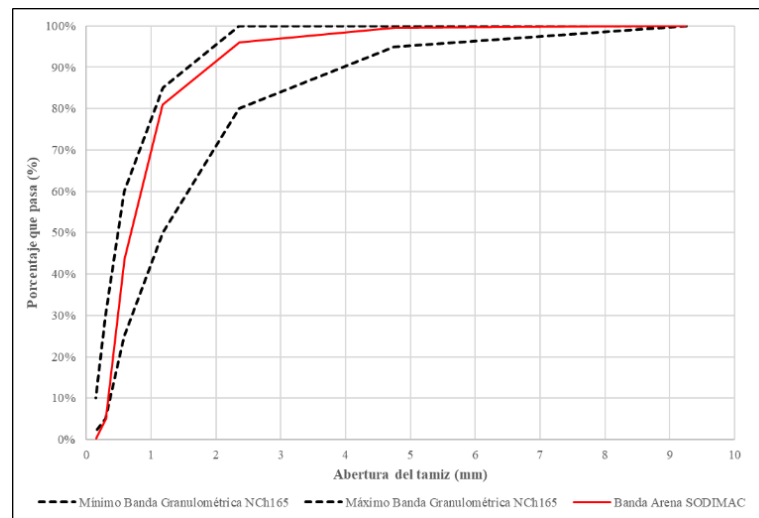


Figura 4.2 Curva granulométrica de árido fino 16/04/2025

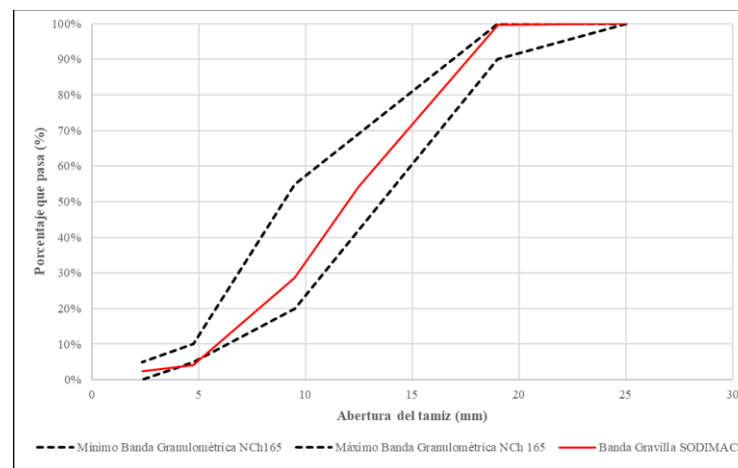


Figura 4.3 Curva granulométrica de árido grueso 26/06/2025

En resumen, los resultados obtenidos tanto de densidades reales y netas, absorción y granulometría, muestran que el material cumple con los requisitos establecidos por las normativas ya mencionadas anteriormente lo que se traduce en una base confiable para la utilización de estos en la confección de hormigones y en la evaluación de estas mezclas de hormigón con adición de nanofibras de celulosa.

4.3. Determinación de la docilidad

Este ensayo corresponde a la determinación de la docilidad mediante el método del asentamiento del cono de Abrams establecido por la normativa chilena NCh1019:2009, la cual permite conocer el descenso que experimenta el hormigón fresco de acuerdo con el procedimiento realizado en estanorma

y sirve como medida práctica de la facilidad del hormigón fresco para ser transportado, colocado y compactado sin que se produzca segregación, lo que es definido como docilidad.

En resumen, el método es el siguiente, una muestra de hormigón fresco se coloca y compacta en tres capas con la misma cantidad de material en un molde con forma de tronco cónico (cono de Abrams). El molde se levanta dejando que la mezcla se asiente. Se mide y registra el asentamiento del hormigón como la distancia vertical entre la altura original y la posición final del centro de la superficie superior de este.

El objetivo es analizar la influencia del tamaño y concentración de la NFC sobre la consistencia del hormigón fresco, considerando el uso de nanofibras de celulosa en forma pura TG (tamaño grande) y TP (tamaño pequeño) con concentraciones de 0,1% y 0,05%.

A continuación, se presentan las figuras 4.4 a 4.8 que muestran los descensos de cono de Abrams en centímetros de las dosificaciones Patrón, A-NFC-TG-0,05%, A-NFC-TG0,1%, A-NFC-TP-0,05% y A-NFC-TP-0,1%, correspondientes a cada confección, donde un valor más alto representa una mezcla dócil, mientras que un valor bajo es significado de una mezcla con baja docilidad.

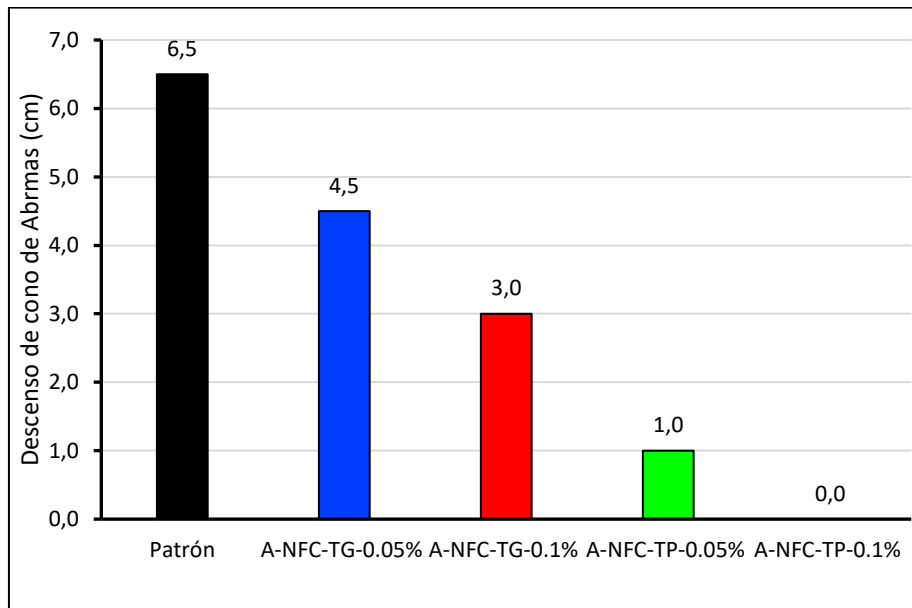


Figura 4.4 Descenso de cono de Abrams(cm) confección 12/05/2025

Los resultados muestran que la presencia de NFC en sus dos tamaños y concentraciones afecta reduciendo el asentamiento y por consecuencia la docilidad de las mezclas con la incorporación de este aditivo. En la primera confección (Figura 4.4) se aprecia que la NFC TP presentó el menor asentamiento, llegando incluso a tener un valor nulo cuando se utiliza en concentración del 0,1% en comparación con la NFC TG la cual en concentración del 0,05% presenta una variación del 31% con respecto a la mezcla Patrón

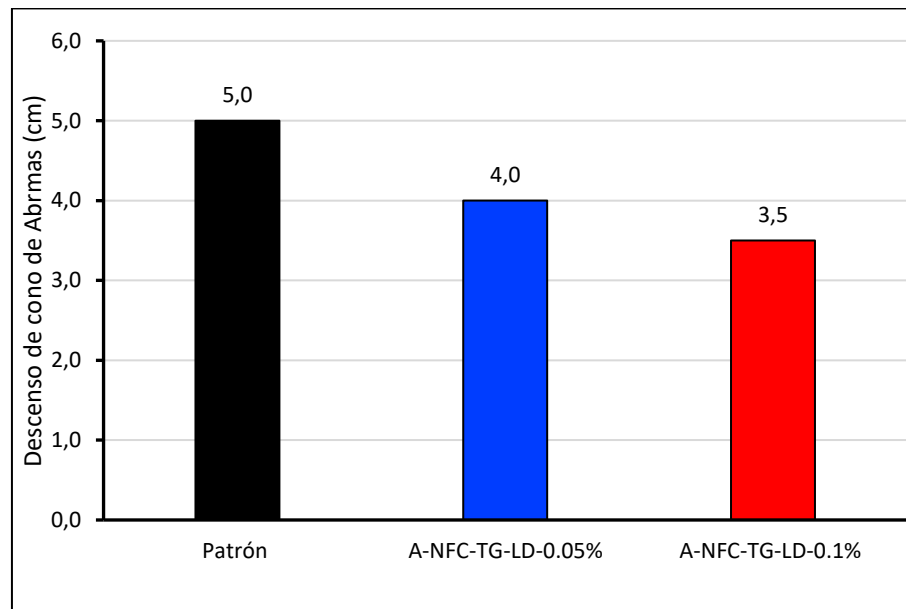


Figura 4.5 Descenso de cono de Abrams(cm) confección larga duración 03/06/2025

En cuanto a la confección de larga duración (Figura 4.5) la que incluye un Patrón, NFC TG 0,05% y NFC TP 0,05% se aprecia la misma tendencia, la adición de NFC reduce el asentamiento en menor proporción para NFC TG 0,05% siendo una variación de solo el 20% y un 30% para la mezcla con NFC TP 0.05%.

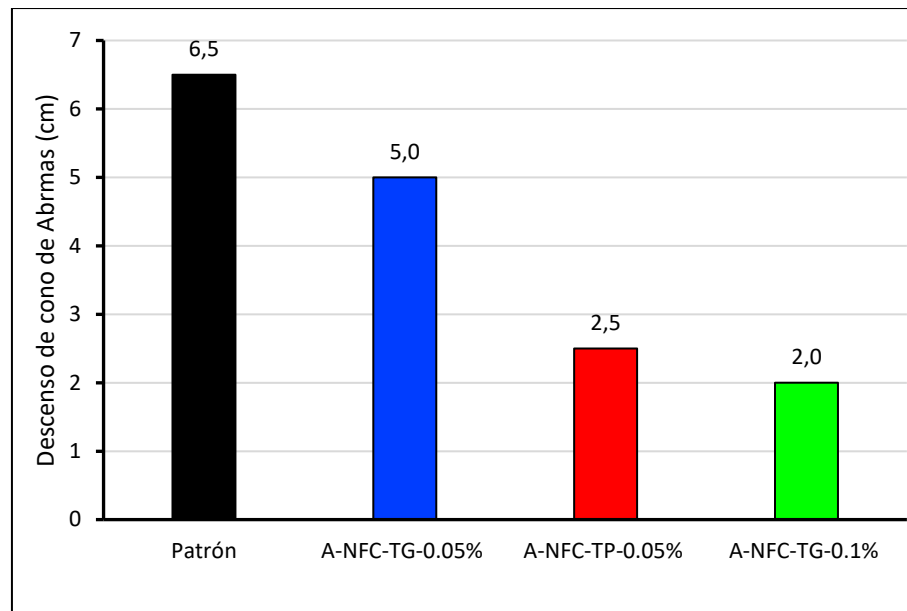


Figura 4.6 Descenso de cono de Abrams(cm) confección verificación 17/06/2025

Con el objetivo de verificar los resultados, la confección realizada en la fecha del 17 de junio de 2025 (Figura 4.6) muestra que la mezcla de NFC TG 0,05% presenta una variación del 23% con respecto a la mezcla Patrón, seguida por la mezcla de NFC TP 0,05% y NFC TG 0,1% con una variación del 62% y 69% respectivamente.

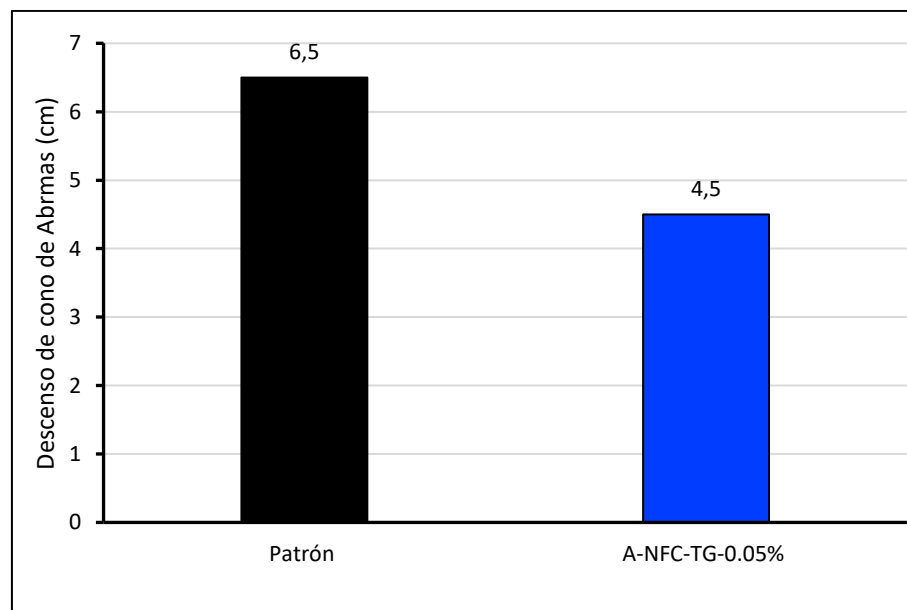


Figura 4.7 Descenso de cono de Abrams(cm) confección durabilidad I 18/07/2025

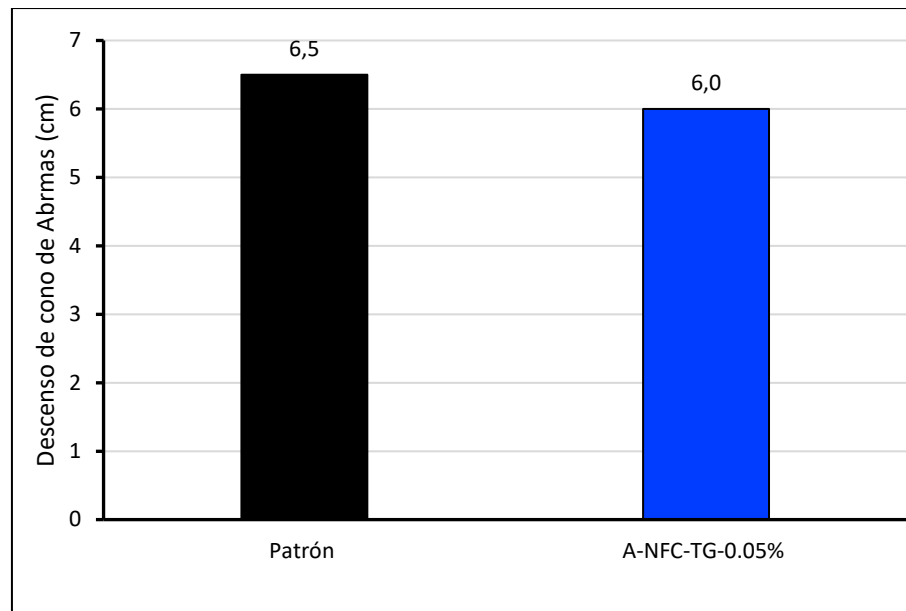


Figura 4.8 Descenso de cono de Abrams(cm) confección durabilidad II 30/07/2025

Finalmente, las últimas dos confecciones realizadas para ensayos de durabilidad (Figura 4.7 y 4.8) que corresponden a mezcla Patrón y NFC TG 0,05% se comportan de la misma manera frente a la adición de NFC, con un descenso de cono de Abrams de 6,5 cm en la mezcla Patrón y 4,5 cm en la mezcla con NFC, siendo una variación por parte de la mezcla NFC TG 0,05% del 25%, siguiendo la misma magnitud de valor que las confecciones anteriores. Esto permite concluir que la mezcla de hormigón con mejor comportamiento es la NFC TG 0,05%.

Este fenómeno se explica debido a que la nanofibra de celulosa al tratarse de un nanomaterial modifica la nano y microestructura de la mezcla de hormigón y al ser introducidas estando en un medio acuoso estas se comportan como una red entrelazada tipo gel gracias a los enlaces de hidrogeno entre fibrillas y un área de superficie alta generando entonces un cambio en la viscosidad de la mezcla produciendo un efecto negativo en cuanto a la trabajabilidad de las mezclas como menciona Rocha et al.

4.4. Resistencia a la compresión

Este apartado contempla los resultados obtenidos al realizar el ensayo de compresión a las probetas de hormigón a las edades de curado de 7, 14, 28 días normalmente y un caso de estudio de larga duración que contempla ensayo a compresión a las edades de 28, 56 y 90 días, todas ensayadas bajo lo que rige la norma chilena NCh 1037:2009 – Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cubicas

y cilíndricas. Este ensayo permite conocer la capacidad del hormigón para soportar una carga por unidad de área sin deformarse ni romperse. Esta es la propiedad mecánica más importante del hormigón la cual determina la durabilidad y seguridad de las estructuras construidas.

El objetivo es evaluar la influencia del uso de nanofibras de celulosa en forma pura de TG y TP en concentraciones 0,1% y 0,05% con respecto a la masa de cemento a las edades mencionadas anteriormente. A continuación, se muestran los resultados obtenidos graficados como una evolución de las resistencias a compresión al pasar las edades de ensayo y según el tipo de mezcla analizada.

A continuación, se presentan las figuras 4.9 a 4.18, las cuales muestran los resultados obtenidos de resistencia a compresión y evolución de esta misma a las edades de 7, 14, 28, 56 y 90 días

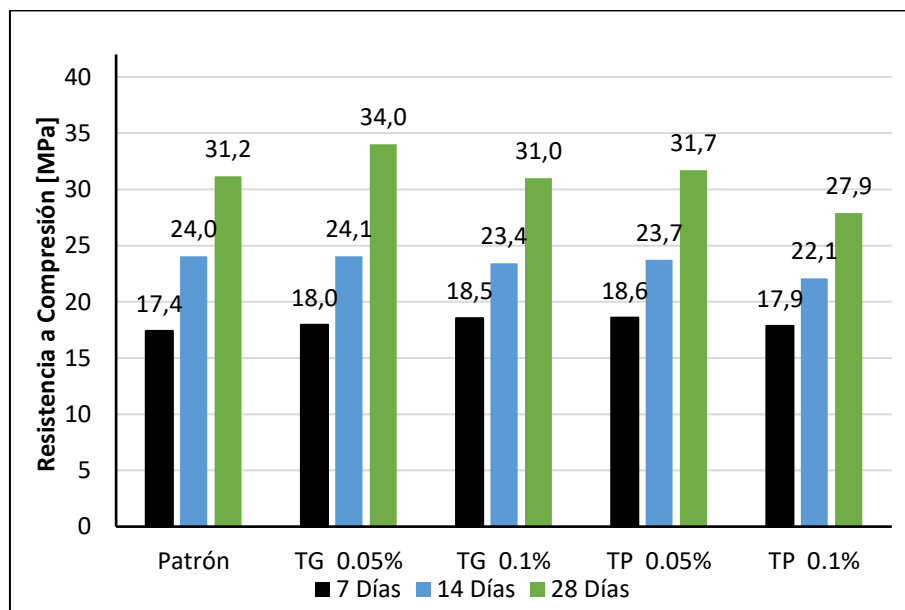


Figura 4.9 Resistencia a compresión edades 7, 14 y 28 días confección 12/05/2025

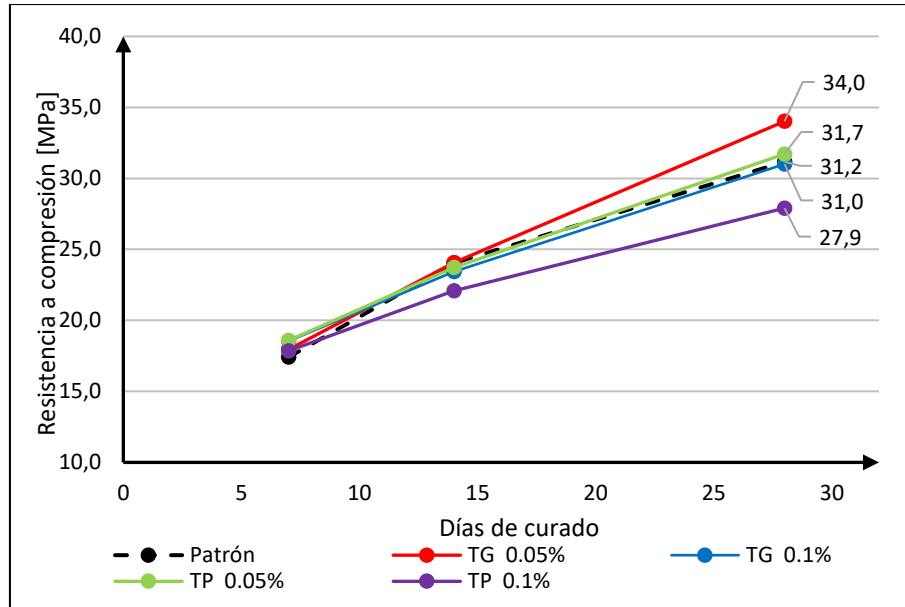


Figura 4.10 Evolución de resistencia a compresión edades 7, 14 y 28 días confección 12/05/2025

Las Figuras 4.9 y 4.10 muestran cómo se comporta la nanofibra de celulosa en las distintas dosificaciones a 7, 14 y 28 días. A edades de 7 días el Patrón alcanza una resistencia de 17,4 MPa, siendo superado en un 3,1%, 6,5%, 6,8% y 2,6% por las dosificaciones NFC TG 0,05%, NFC TG 0,1%, NFC TP 0,05% y NFC TP 0,1% respectivamente, lo que se traduce en un buen desempeño de resistencia a compresión a corta edad. La resistencia a edad de 14 días tiene un comportamiento irregular con respecto al Patrón de 24,0 MPa, el cual es sobrepasado solo por la dosificación NFC TG 0,05% en un 0,1% mientras que las demás dosificaciones caen en un valor porcentual de hasta un 8,1%. Finalmente, llegando a los 28 días de curado el Patrón adopta una resistencia de 31,2 MPa. La adición de NFC TG 0,05% incrementó la resistencia a 34,0 MPa lo cual es una variación de 9,1%, NFC TP 0,05% igualmente incrementó su resistencia en menor proporción llegando a 31,7 MPa con variación del 1,7%. Por otro lado, las dosificaciones con concentraciones del 0,1% presentaron un descenso en resistencia, siendo la más perjudicada la fibra de tamaño pequeño con un valor de 27,9 MPa que representa un -10,5% del valor Patrón, mientras que las nanofibras de tamaño grande presentó una ligera variación de un -0,5% con una resistencia de 31,0 MPa. Estos resultados demuestran que la adición de nanofibras de celulosa en concentraciones de 0,05% es adecuada para mejorar la resistencia a compresión de los hormigones, particularmente en el caso de la nanofibra de celulosa de tamaño grande que muestra un buen desempeño en las tres edades de ensayo.

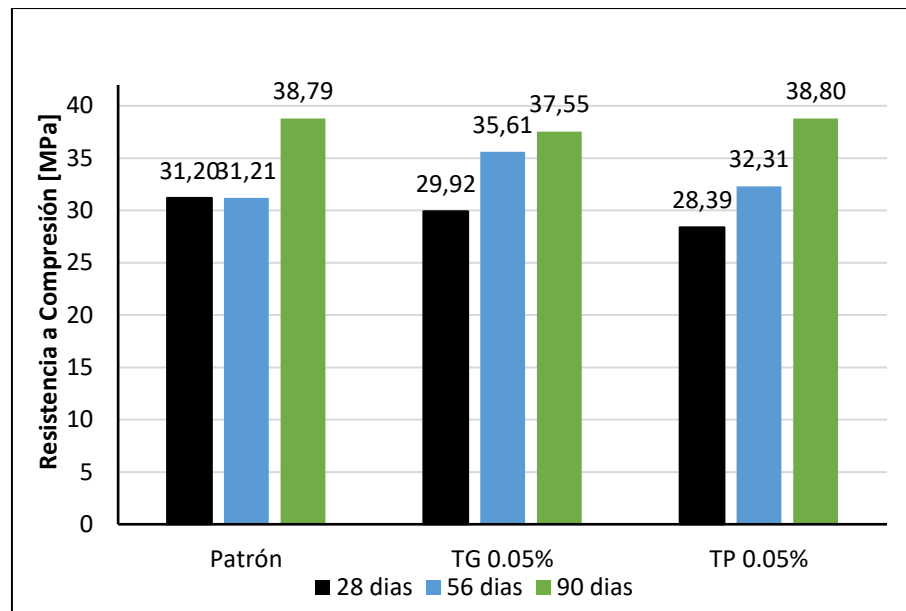


Figura 4.11 Resistencia a compresión edades 28, 56 Y 90 días confección larga duración 03/06/2025

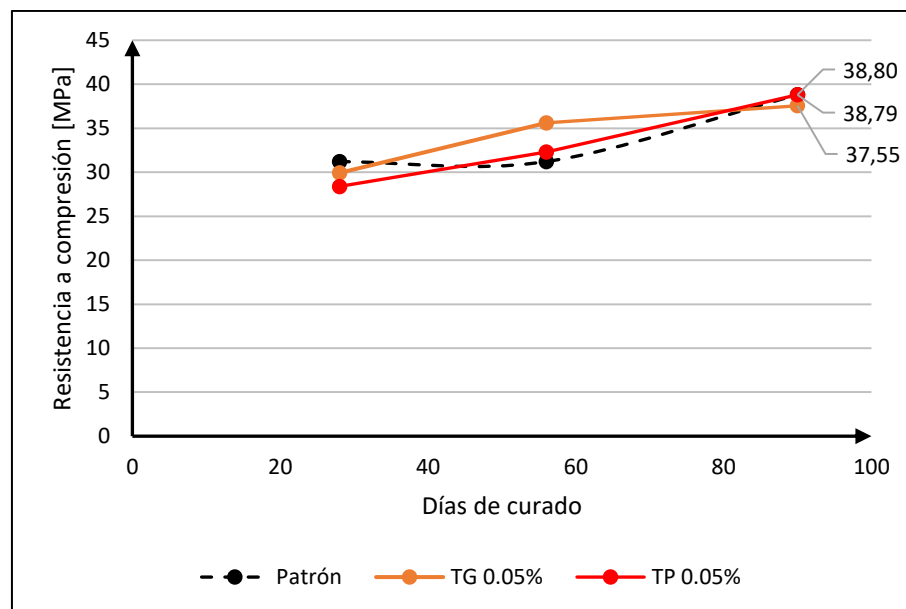


Figura 4.12 Evolución de resistencia a compresión edades 28, 56 y 90 días confección larga duración 03/06/2025

En las Figuras 4.11 y 4.12 se aprecia la evolución de resistencia de tres dosificaciones de hormigón a edades de 28, 56 y 90 días, en esta evaluación se analiza la influencia de la nanofibra de celulosa en concentración de 0,05% en tamaño TG y TP dado el desempeño de la primera confección donde se aprecia que baja concentración presenta una mejora en resistencia. El mayor desempeño en cuanto a resistencia se da a la edad de 56 días de curado donde NFC TG 0,05% adopta un valor de 35,61MPa en comparación al Patrón con 31,21MPa siendo una variación positiva de 14,1%, las demás

dosificaciones presentan valores dentro del mismo rango del Patrón con un ligero descenso en resistencia llegando a una variación máxima de -9,1% por la dosificación NFC TP 0,05% a 28 días con una diferencia de 2,81MPa.

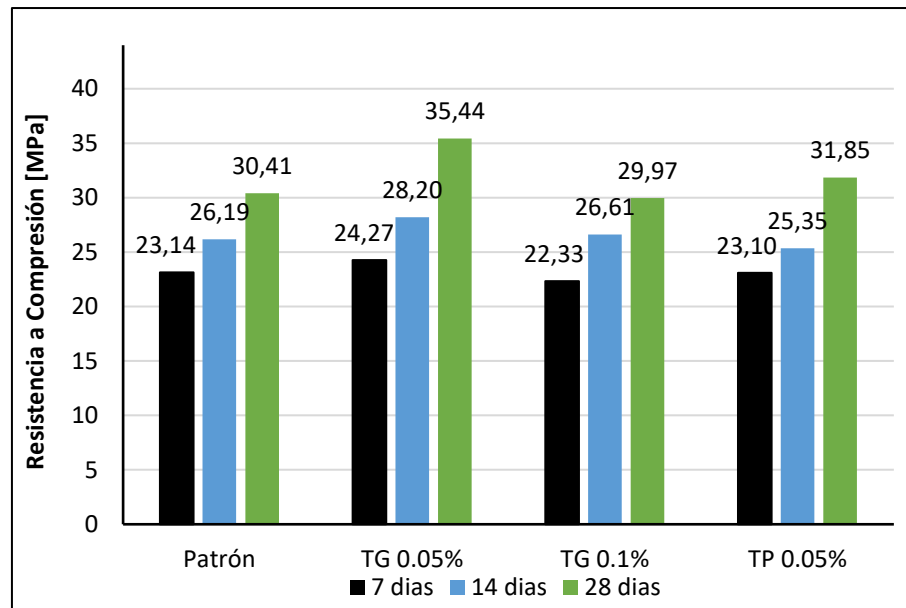


Figura 4.13 Resistencia a compresión edades 7, 14 y 28 días confección verificación 17/06/2025

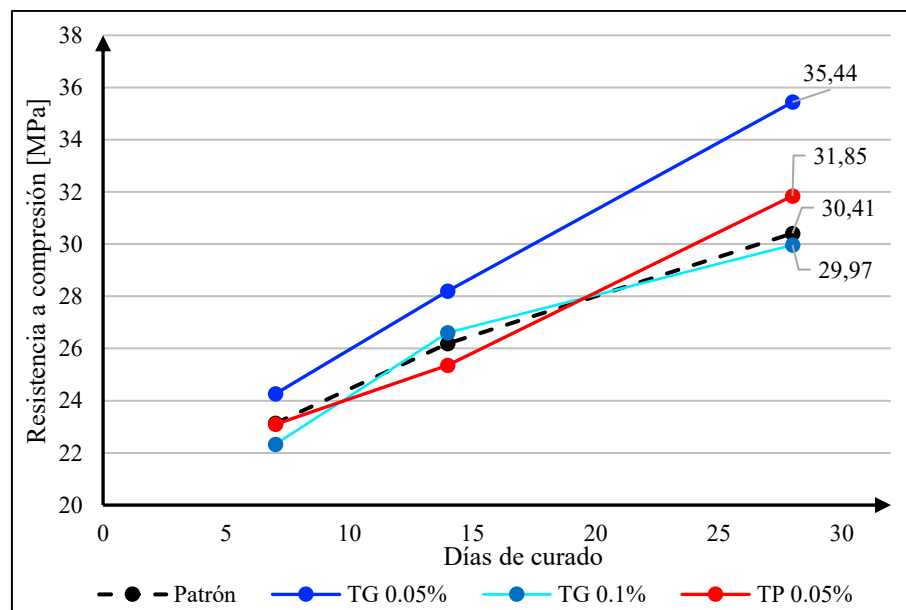


Figura 4.14 Evolución de resistencia a compresión edades 7, 14 y 28 días confección verificación 17/06/2025

Con el fin de realizar una verificación a los resultados obtenidos en la confección realizada el 12 de mayo de 2025, se confeccionó hormigón con dosificaciones Patrón, NFC TG 0,05%, NFC TG 0,1% y NFC TP 0,05% con el fin de acotar la investigación a las dosificaciones con mejor desempeño en temas de resistencia a compresión. Los resultados se presentan en las Figuras 4.13 y 4.14 donde a los 7 días se mantiene la tendencia de la dosificación de concentración 0,05% en tamaño grande a superar al Patrón en 4,9% y se proyecta para las edades de 14 y 28 días con un aumento en 7,7% y 16,5% respectivamente. Por parte de NFC TG 0,1% a 7 días adopta una resistencia menor al Patrón en -3,5% y una mejoría a 14 días en 1,6%, sin embargo, decae a los 28 días en 1,5%. Finalmente, la dosificación de tamaño pequeño en concentración de 0,1% NFC TP 0,1% presenta un ligero descenso de resistencia a 7 y 14 días, lo que se revierte a 28 días superando al hormigón Patrón adoptando 31,85MPa, 1,44MPa de mejoría. Esta verificación de resultados reafirma la influencia de la nanofibra de celulosa en dosificación NFC TG 0,05% como la que favorece al comportamiento mecánico de resistencia a compresión.

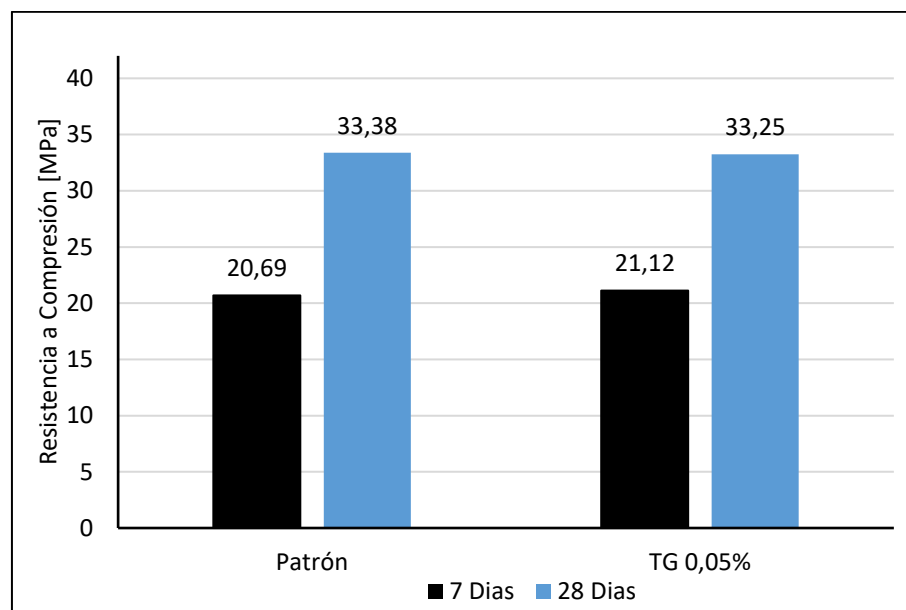


Figura 4.15 Resistencia a compresión edades 7 y 28 días confección durabilidad I 18/07/2025

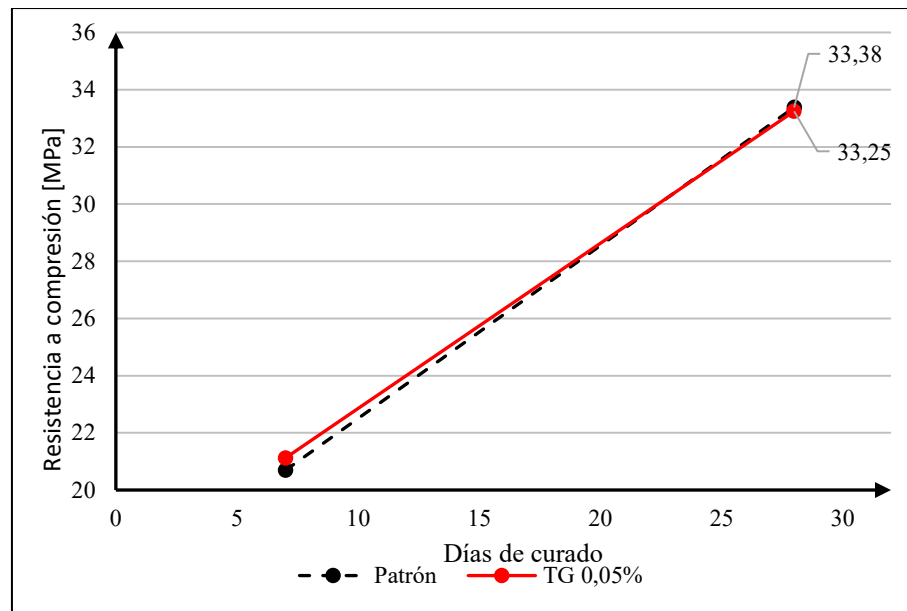


Figura 4.16 Evolución de resistencia a compresión edades 7 y 28 días confección durabilidad I 18/07/2025

En función de los resultados obtenidos en la confección de verificación, el análisis se acota a evaluar la influencia de la nanofibra en su dosificación de NFC TG 0,05% a 7 y 28 días. Se realizaron dos confecciones que contemplan un hormigón Patrón y NFC TG 0,05% en las fechas mencionadas en el capítulo anterior. Las Figuras 4.15 y 4.16 exponen los resultados de la confección durabilidad I donde a 7 días la adición de nanofibra de celulosa tiene un impacto positivo en 2,1% con una resistencia de 21,12MPa en comparación al Patrón de 20,69MPa. A 28 días la resistencia del hormigón con presencia de nanofibra de celulosa presenta un descenso en resistencia de 33,38MPa que marca el Patrón a 33,25MPa lo que no es una diferencia significativa que es tan solo del 0,4%.

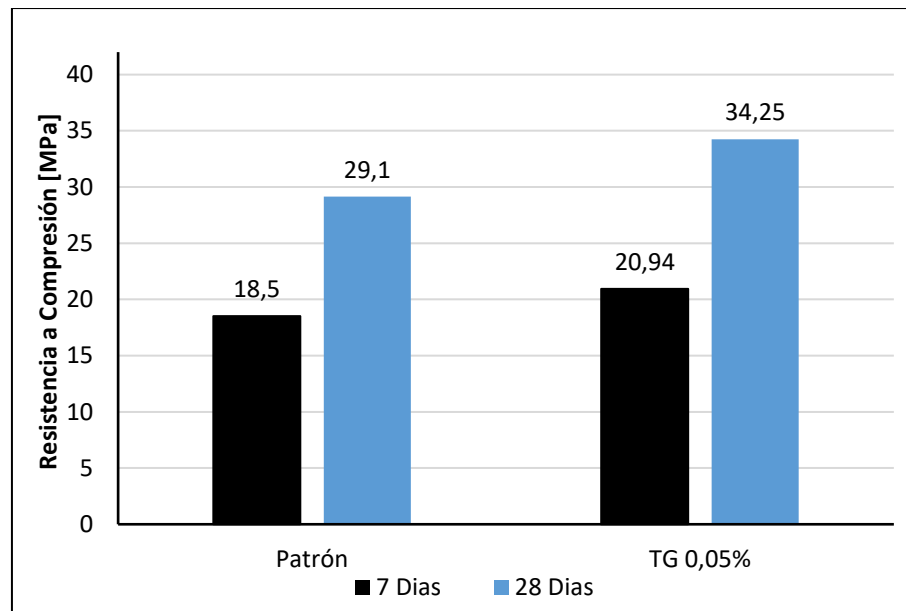


Figura 4.17 Resistencia a compresión edades 7 y 28 días confección durabilidad II 30/07/2025

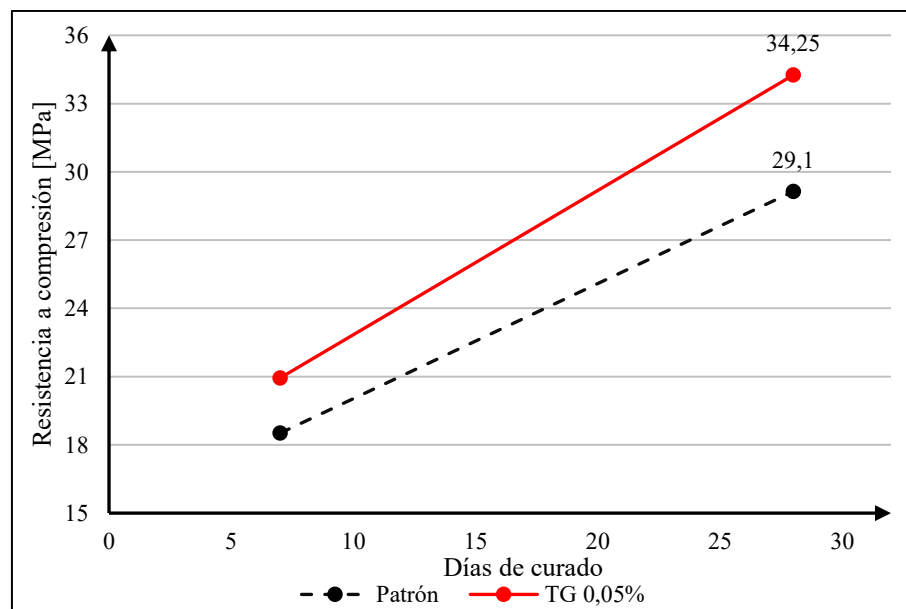


Figura 4.18 Evolución de resistencia a compresión edades 7 y 28 días confección durabilidad II 30/07/2025

La confección de durabilidad II correspondiente a las Figuras 4.17 y 4.18 adopta valores sobresalientes de resistencia a las dos edades de ensayo con una diferencia de un 13,1% y 17,6% con respecto al Patrón para edades de 7 y 28 días. Obteniendo resistencia de 20,94MPa a 7 días y 34,25MPa a 28 días.

En resumen, la adición de nanofibras de celulosa demostró capacidad para mejorar la resistencia a compresión, logrando incrementos de hasta un 17,6% con dosificaciones de NFC-TG al 0,05% en la

campana de Durabilidad II. Sin embargo, al analizar la totalidad de las coladas, este efecto no se replicó con la misma magnitud (por ejemplo, en la campana de Durabilidad I), lo que evidencia una notable variabilidad intercolada. Esta dispersión de resultados indica que el desempeño mecánico de la mezcla modificada es altamente sensible a las condiciones experimentales de cada amasada. Factores como ligeras fluctuaciones en la humedad de los áridos, pequeñas diferencias en la energía de compactación aplicadas —derivadas de la menor trabajabilidad de la mezcla en estado fresco— y las variaciones naturales en el proceso de curado, inciden directamente en el desarrollo de la resistencia. En consecuencia, si bien la NFC posee un potencial claro de refuerzo, sus beneficios macroscópicos están estrechamente condicionado a la variabilidad intrínseca de la confección.

4.5. Pérdida por ignición (LoI)

Esta sección del Capítulo IV contempla los resultados obtenidos a través del ensayo de pérdida por ignición (*Loss on Ignition*, LOI por sus siglas en inglés) con el fin de determinar el grado de hidratación del cemento que experimenta en las mezclas de hormigón duras con adición de nanofibras de celulosa.

El ensayo consiste en calentar una muestra de cemento, pasta o polvo de hormigón a altas temperaturas durante un tiempo determinado, la masa que se pierde al calentar el material proviene de componentes volátiles o que se descomponen térmicamente. Cuando se realiza este ensayo en una muestra de hormigón lo que se busca es cuantificar indirectamente el grado de hidratación del cemento, en otras palabras, cuanto del cemento presente en la mezcla ha reaccionado con el agua para formar los productos de hidratación. El compuesto clave que se descompone en este ensayo es el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) conocido también como portlandita que se forma directamente por la hidratación de los silicatos (C_3S y C_2S) del cemento y su cantidad está directamente relacionada con el grado de hidratación del cemento. Durante la hidratación, se forma el gel C-S-H que es quien proporciona la resistencia al hormigón y Ca(OH)_2 que indica la hidratación, por lo que con el ensayo LOI se busca relacionar la pérdida de masa en la zona del Ca(OH)_2 lo que indica que, a más pérdida de masa de este compuesto, existe una mayor hidratación y por consecuencia más gel C-S-H generado, favoreciendo así a la resistencia mecánica del hormigón.

Los resultados se muestran a continuación a través de gráficos de barras en las Figuras 4.19 a 4.28, exponiéndolos en función de la edad de curado y el tipo de mezcla junto con la variación porcentual respecto al Patrón.

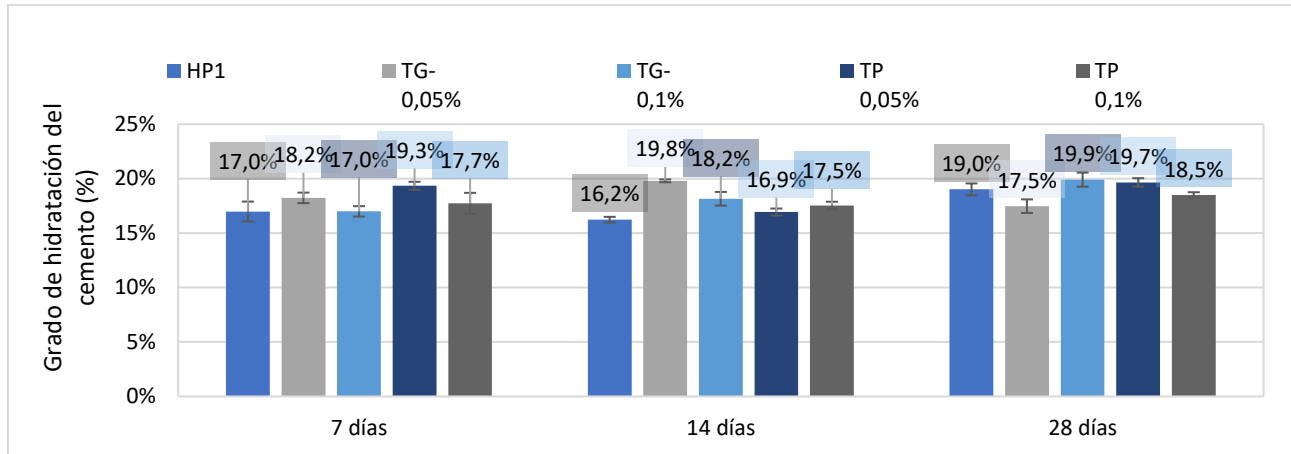


Figura 4.19 LOI confección 12/05/2025

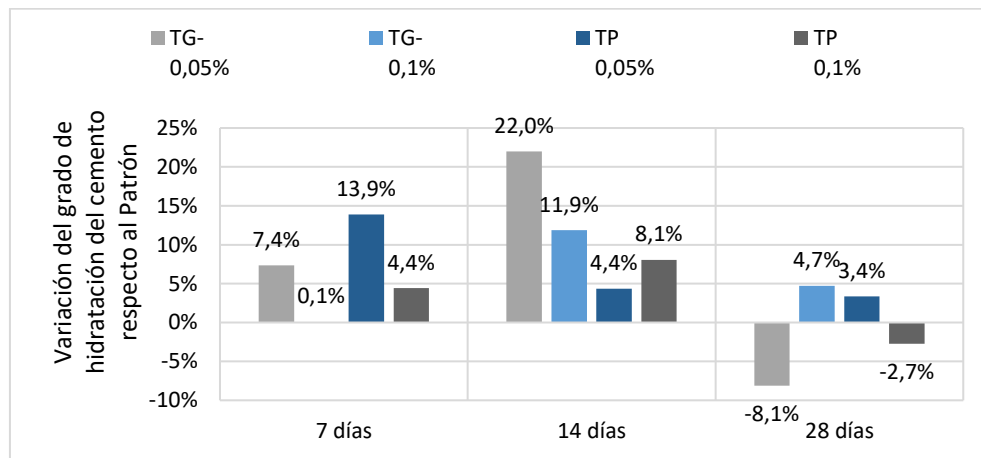


Figura 4.20 % variación LOI confección 12/05/2025

La confección realizada la fecha del 12/05/2025 correspondiente a la Figura 4.19 y 4.20 muestra que a 7 días los resultados de pérdida de masa tras realizar el ensayo se mantiene regular en todas las dosificaciones, con resultados desde un 17% perteneciente a la dosificación Patrón y TP 0,05%, 17,7% de TP 0,1% lo que representa una variación del 4,4%, seguido de la dosificación TG 0,05% con un 18,2% de pérdida de masa con variación del 7,4% respecto al Patrón y por último el que presenta mayor pérdida de masa corresponde a la muestra TP 0,05% con 19,3% siendo una variación del 13,9% con respecto al hormigón Patrón. Para el día 14 la tendencia se sigue manteniendo, donde todas las

mezclas presentaron mayor pérdida de masa que el Patrón con variaciones de 22% por parte de TG 0,05%, 11,9% TG 0,1%, 4,4% TP 0,05% Y 8,1% TP 0,1%. Finalmente, el escenario no se mantiene con la misma tendencia, se logra observar que a 28 días TG 0,05% la cual venia con pérdida de masa superior al Patrón en las dos edades evaluadas anteriormente ahora presenta una variación de -8,1% respecto al Patrón, junto con TP 0,1% la cual también presenta una variación negativa con -2,7%, caso contrario donde TG 0,1% alcanza una variación del 4,7% y TP 0,05% 3,4% con respecto a la dosificación sin adición de NFC.

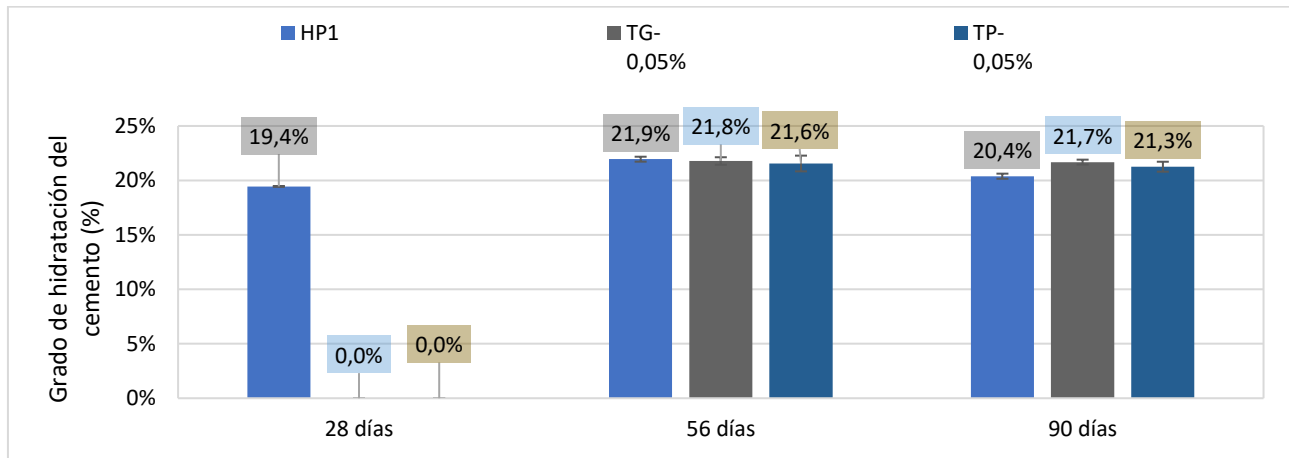


Figura 4.21 LOI confección larga duración

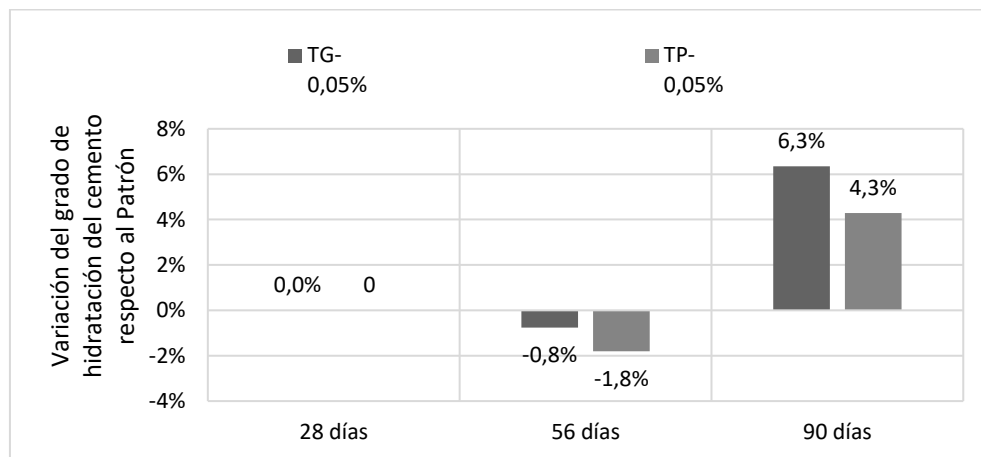


Figura 4.22 % variación LOI confección larga duración

Las muestras extraídas de la confección de larga duración a los 28 días correspondientes a la Figura 4.21 y 4.22 presentaron problemas al momento de ser ensayadas por lo que no existen valores a comparar por parte de las dosificaciones TG 0,05% y TP 0,05% frente al Patrón que obtuvo una

pérdida de masa del 19,4%. La evaluación a 56 días presenta valores muy similares entre si con un Patrón con 21,9% de pérdida versus un 21,8% y 21,6% por parte de las mezclas TG 0,05% Y TP 0,05%. De igual forma, a 90 días los valores se encuentran cercanos con una pérdida de masa del 20,4% del Patrón, 21,7% de TG 0,05% y 21,3% TP 0,05%, representando variaciones por parte de estas dos últimas de un 6,3% y 4,3% respectivamente.

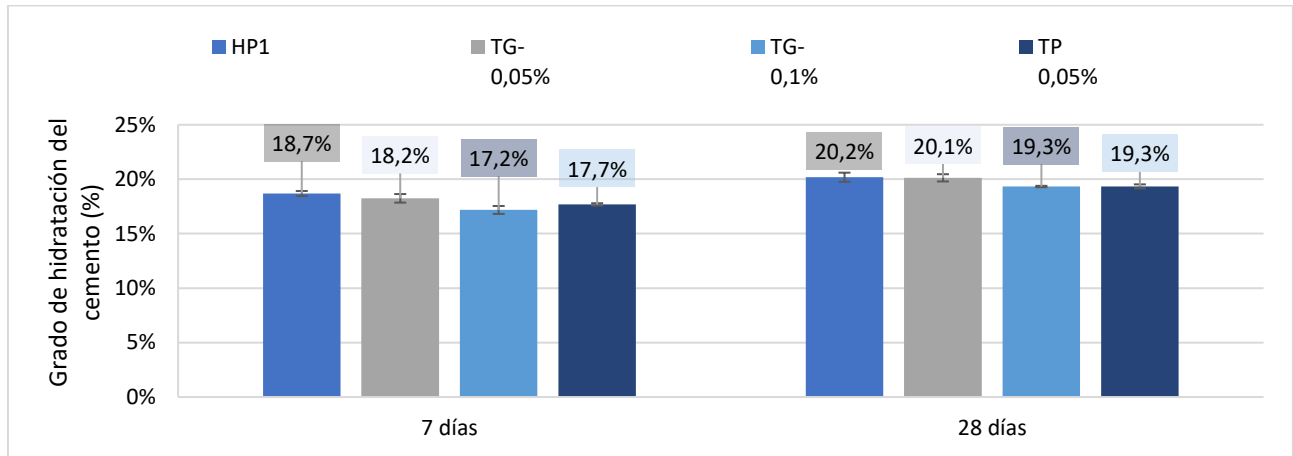


Figura 4.23 LOI confección larga verificación

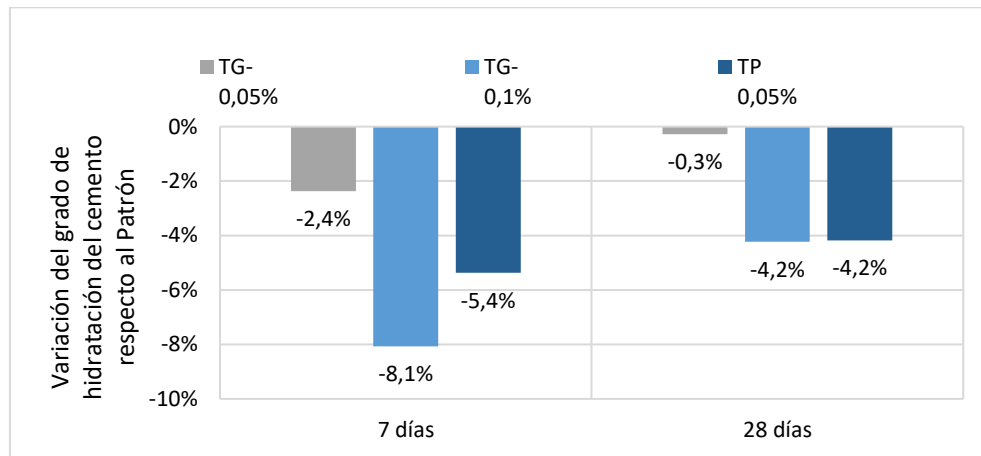


Figura 4.24 % variación LOI confección verificación

En cuanto a la verificación se analizaron las muestras a edades de 7 y 28 días debido a un festivo que resultó ser en el día 14 de curado. Esta tanda de ensayos presentes en la Figura 4.23 y 4.24 resultó ser diferente a lo que mostró la primera confección, donde a 7 días las pérdidas de masa de las dosificaciones con adición de NFC fueron menores al Patrón de 18,7%, TG 0,05% obtuvo una pérdida

de 18,2%, TG 0,1% 17,2% y TP 0,05% 17,7%, representando variaciones de -2,4%, -8,1% y -5,4% respectivamente. Las muestras a 28 días presentaron la misma tendencia, pero con variaciones menores, donde, Patrón obtuvo una pérdida de masa de 20,2%, TG 0,05% 20,1%, TG 0,1% 19,3% y TP 0,05% 19,3%, lo cual significa variaciones de -0,3%, -4,2% y -4,2% con respecto al Patrón siguiendo el mismo orden.

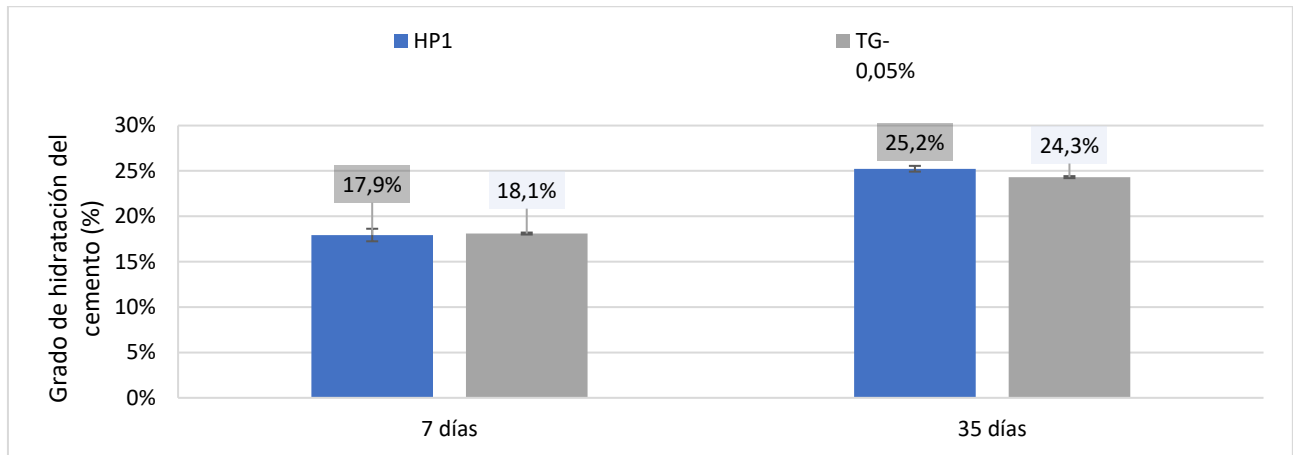


Figura 4.25 LOI confección Durabilidad I

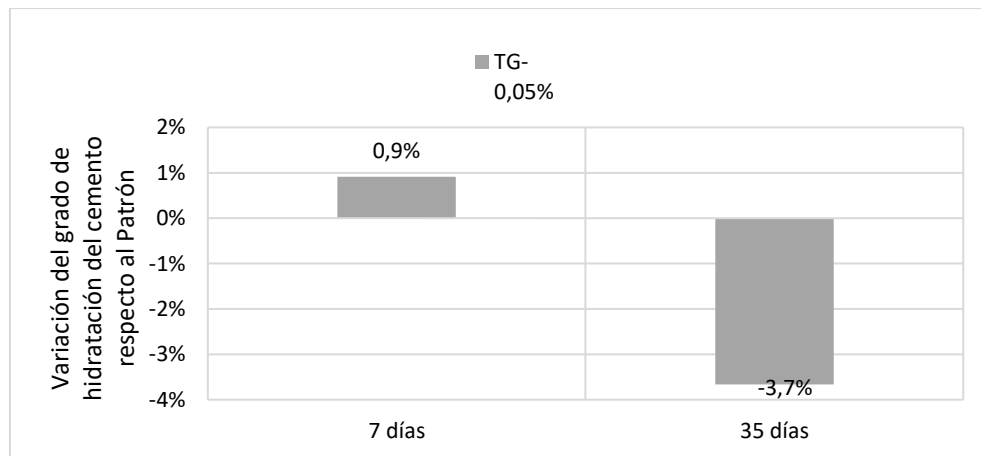


Figura 4.26 % variación LOI confección Durabilidad I

En cuanto a las confecciones Durabilidad I y II igual fueron analizadas en dos edades de ensayo. Durabilidad I correspondiente a la Figura 4.25 y 4.26, a los 7 días presentó valores de 17,9% y 18,1% de pérdida de masa en las muestras Patrón y TG 0,05% respectivamente, mientras que a 35 días el Patrón tomó valor de 25,2% versus 24,3% de TG 0,05%. Esto quiere decir que a 7 días TG 0,05% tuvo una variación de 0,9% mientras que a 35 días -3,7%.

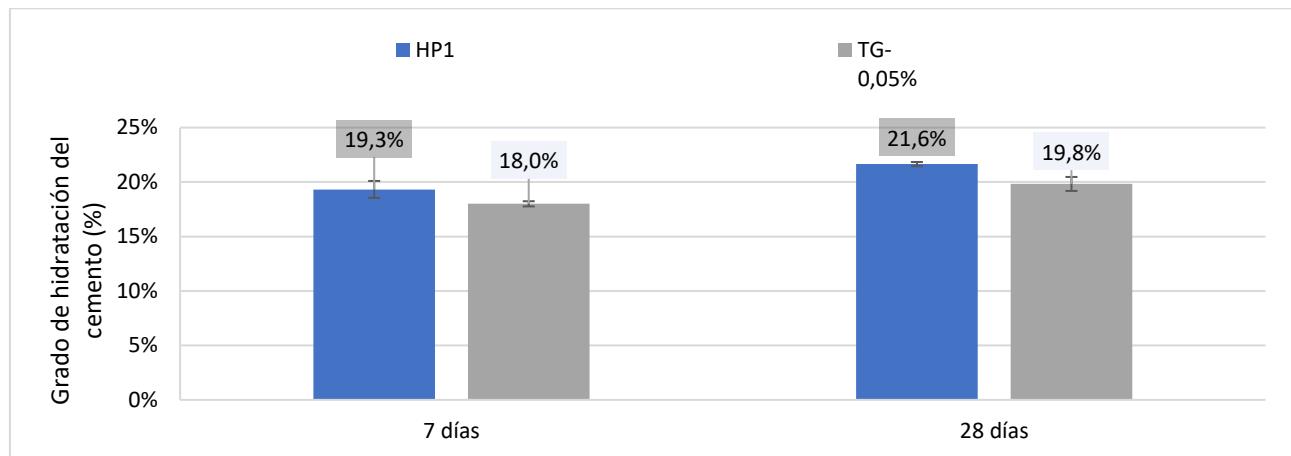


Figura 4.27 LOI confección Durabilidad II

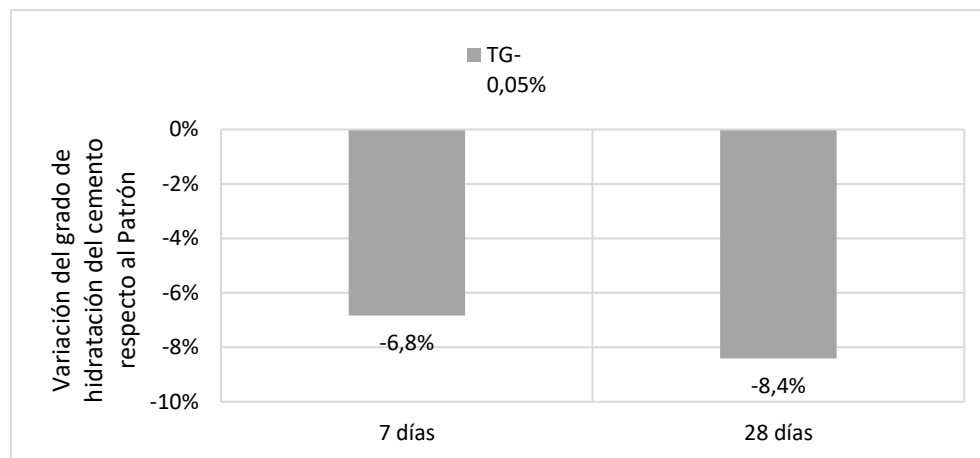


Figura 4.28 % variación LOI confección Durabilidad II

Durabilidad II que se muestra en la Figura 4.27 y 4.28, en su día 7 obtuvo un valor Patrón de 19,3% mientras que TG 0,05% 18,0%. A edad de 28 días estas muestras tomaron una pérdida de masa de 21,6% por parte del Patrón y un 19,8% TG 0,05%. Lo que representa una variación a 7 días de -6,8% y -8,4% a 28 días.

A partir de las mediciones de Pérdida por Ignición (LOI), se estimó el Grado de Hidratación (DOH) del cemento para evaluar el efecto de curado interno. En conjunto, los resultados evidenciaron una alta dispersión, presentando coladas donde las mezclas con NFC superaron al patrón, y otras —como en las coladas de verificación a 7 y 28 días— donde las variaciones de pérdida de masa fueron negativas, alcanzando hasta un -8,1% y -4,2% respecto al hormigón de referencia.

Estos resultados contradictorios descartan la premisa de que la incorporación de nanofibras garantice de manera inherente una microestructura permanentemente más estable, de mayor hidratación y menos porosa. Por el contrario, la fluctuación en los datos revela que el grado de hidratación en matrices con nanomateriales es sumamente sensible a la variabilidad experimental intercolada. Las reducciones en el DOH sugieren que, debido a la extrema afinidad de la celulosa por el agua, ligeras variaciones operacionales o fluctuaciones en la humedad efectiva de los agregados generan una fuerte competencia por el agua libre durante el mezclado. En consecuencia, las fibras pueden retener el fluido en sus enlaces en lugar de cederlo de manera gradual y uniforme hacia el cemento anhidro, interrumpiendo localmente la formación de geles C-S-H y justificando la caída en el parámetro de pérdida de masa térmica.

Esta aparente contradicción empírica —donde se obtienen menores grados de hidratación, pero simultáneamente se registran aumentos en la resistencia a la compresión respecto al patrón— se justifica porque el principal aporte de las NFC a la matriz cementicia es físico-mecánico y no puramente químico. Aunque el ensayo LOI acuse un déficit de productos de hidratación debido a la retención de agua, la fracción de fibras dispersas en la mezcla actúa como un andamiaje tridimensional robusto. Estas fibras proveen un mecanismo de puenteo de fisuras (*crack bridging*) a microescala y disipan la energía de fractura mediante la fricción generada por el deslizamiento y extracción de la fibra frente a las tensiones. Por lo tanto, se concluye que el aumento en la resistencia mecánica de las mezclas dopadas no depende exclusivamente de lograr un curado interno químico infalible, sino del potente efecto de refuerzo físico proporcionado por las nanofibras, cuyos beneficios macroscópicos están estrictamente condicionados por la variabilidad en las condiciones de confección de cada amasada.

4.6. Absorción capilar

En esta sección se presentan los resultados experimentales de los ensayos de absorción capilar para las probetas de hormigón con adición de NFC confeccionadas como Durabilidad I y II. De acuerdo con el enfoque del estudio, el análisis se centra tanto en la sorptividad inicial (S_i) como en la sorptividad secundaria (S_s).

Los valores obtenidos de absorción acumulada $I(t)$, calculados a partir de las mediciones de masa en función del tiempo, se representan de forma detallada en el apartado de Anexos. En dichas tablas se incluye el conjunto completo de datos registrados para cada mezcla, probeta y cara (superior e inferior), expresados en función del tiempo (t), la raíz cuadrada del tiempo ($\sqrt{t}$) y la absorción acumulada (I), conforme a la ecuación de la ASTM C1585-20.

Los gráficos correspondientes a las curvas de absorción capilar para cada ensayo realizado ya sea de sorptividad inicial y secundaria para Durabilidad I y II, se presentan en el Anexo 4.1.

4.6.1 Resultados de sorptividad inicial y coeficiente de determinación (R^2)

En las Tablas 4.2 y 4.3 se presentan los valores obtenidos de sorptividad inicial (S_i), calculados a partir de la pendiente de la fase inicial de las curvas $I - \sqrt{t}$, correspondiente a los primeros minutos del ensayo. Este parámetro representa la velocidad de ingreso de agua en la etapa de succión capilar rápida, donde el flujo está dominado por la acción de los poros superficiales y las microfisuras conectadas. El S_i permite evaluar la permeabilidad superficial del hormigón y su capacidad de absorción inmediata frente al contacto con el agua. Valores elevados de S_i indican mayor facilidad de entrada inicial de humedad, mientras que valores más bajos reflejan una superficie más densa y resistente al ingreso.

Tabla 4.2 Resultados de sorptividad inicial (S_i) y coeficiente de determinación (R^2) para las probetas de hormigón con y sin NFC. Campaña durabilidad I

Tipo de hormigón	Tasa de absorción inicial (mm/s ^{1/2}) (S_i)	Coeficiente de correlación lineal R^2	Variación porcentual con respecto al Patrón
Patrón Sup	0,0131	0,90	-
Patrón Inf	0,0131	0,88	-
NFC TG 0,05% I Sup	0,0103	0,88	21%
NFC TG 0,05% I Inf	0,0090	0,88	32%
NFC TG 0,05% II Sup	0,0103	0,90	21%
NFC TG 0,05% II Inf	0,0083	0,90	37%

Tabla 4.3. Resultados de sorptividad inicial (S_i) y coeficiente de determinación (R^2) para las probetas de hormigón con y sin NFC. Campaña durabilidad II

Tipo de hormigón	Tasa de absorción inicial ($\text{mm/s}^{1/2}$) (S_i)	Coeficiente de correlación lineal R^2	Variación porcentual con respecto al patrón
Patrón Sup	0,0065	0,82	-
Patrón Inf	0,0065	0,86	-
NFC TG 0,05% I Sup	0,0072	0,84	-11%
NFC TG 0,05% I Inf	0,0072	0,87	-11%
NFC TG 0,05% II Sup	0,0083	0,87	-26%
NFC TG 0,05% II Inf	0,0069	0,82	-5%

El análisis de la sorptividad inicial arrojó resultados contrapuestos entre las campañas Durabilidad I y Durabilidad II. Mientras que en la primera se observaron reducciones de permeabilidad capilar de hasta un 32% respecto al hormigón de referencia, en la segunda campaña se registraron incrementos. Esta discrepancia evidencia la alta sensibilidad del ensayo y de la propia microestructura del hormigón frente a la variabilidad experimental intercolada. Al incorporar nanofibras, la drástica pérdida de docilidad en estado fresco exige una mayor energía de compactación para consolidar la matriz. Ligeras alteraciones operacionales durante este proceso vibratorio, diferencias en el volumen de vacíos de aire atrapado, o pequeñas variaciones en la humedad efectiva de los agregados al momento del mezclado, pueden alterar significativamente la conectividad de la red capilar en los primeros milímetros de la probeta. En consecuencia, los resultados demuestran que, si bien las NFC poseen el potencial de refinar la estructura de poros, su desempeño macroscópico es altamente dependiente de las fluctuaciones operacionales y de consolidación durante el proceso de confección de cada amasada individual.

Adicionalmente, resulta imperativo analizar la validez matemática del ensayo. El coeficiente de determinación (R^2) asociado a cada ajuste lineal se utiliza para verificar la calidad del modelo en la fase inicial. La literatura técnica establece que el modelo de absorción capilar exige que el agua absorbida sea proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, considerándose un ajuste aceptable cuando $R^2 \geq 0,96$ para que la tasa de absorción sea completamente válida. No obstante, en las Tablas 4.2 y 4.3 se presentan múltiples valores de sorptividad inicial con coeficientes de correlación bajos, oscilando entre 0,82 y 0,90. Esta pronunciada pérdida de linealidad evidencia una distorsión generada por errores experimentales en las primeras lecturas, tales como un exceso de humedad libre en la cara de ensayo al iniciar el contacto con el agua, o la rápida saturación de microfisuras de contracción

superficial generadas durante el curado. Por consiguiente, ante esta falta de linealidad y la variabilidad intercolada registrada, los coeficientes de sorptividad inicial obtenidos no deben interpretarse como constantes físicas absolutas, sino que deben analizarse cautelosamente como indicadores macroscópicos de tendencia, reafirmando que el desempeño de la red capilar requiere un estricto control sobre la humedad y la energía de compactación durante la confección.

4.6.2 Resultados de sorptividad secundaria (S_s)

En las Tablas 4.4 y 4.5 se resumen los valores obtenidos de sorptividad secundaria (S_s), sus respectivos coeficientes de determinación (R^2), calculados a partir del ajuste lineal en la fase de absorción sostenida posterior a las 24 horas de contacto con el agua, y su variación porcentual con respecto a la mezcla Patrón.

La sorptividad secundaria representa la difusión interna de humedad a través de la red capilar del hormigón una vez finalizada la etapa de succión inicial. Este parámetro se asocia directamente con la capacidad de transporte interno de agua a través de los poros finos y la microestructura del gel C-S-H, constituyendo un indicador fundamental de la durabilidad del material a largo plazo. Valores bajos de S_s reflejan una microestructura más refinada y menor conectividad porosa interna, mientras que valores altos indican una red capilar activa con mayor probabilidad de transporte sostenido.

Tabla 4.4 Resultados de sorptividad secundaria (S_s) y coeficiente de determinación (R^2) para las probetas de hormigón con y sin NFC. Campaña Durabilidad I.

Tipo de hormigón	Tasa de absorción secundaria ($\text{mm/s}^{1/2}$) (S_s)	Coefficiente de correlación lineal R^2	Variación porcentual con respecto al Patrón
Patrón Sup	0,0041	0,98	-
Patrón Inf	0,0037	0,97	-
NFC TG 0,05% I Sup	0,0030	0,98	26%
NFC TG 0,05% I Inf	0,0023	0,98	38%
NFC TG 0,05% II Sup	0,0041	0,97	0%
NFC TG 0,05% II Inf	0,0027	0,98	28%

Tabla 4.5 Resultados de sorptividad secundaria (S_s) y coeficiente de determinación (R²) para las probetas de hormigón con y sin NFC. Campaña Durabilidad II.

Tipo de hormigón	Tasa de absorción secundaria (mm/s ^{1/2}) (S _s)	Coefficiente de correlación lineal R ²	Variación porcentual con respecto al patrón
Patrón Sup	0,00202	0,95	-
Patrón Inf	0,00202	0,95	-
NFC TG 0,05% I Sup	0,00199	0,96	2%
NFC TG 0,05% I Inf	0,00234	0,98	-16%
NFC TG 0,05% II Sup	0,00222	0,98	-10%
NFC TG 0,05% II Inf	0,00280	0,98	-38%

El análisis de la sorptividad secundaria (S_s) arrojó resultados fuertemente contradictorios al comparar las distintas campañas de confección. En la Campaña Durabilidad I, el comportamiento del aditivo fue favorable en todas las mediciones: las mezclas con NFC-TG al 0,05% registraron reducciones sustanciales de permeabilidad interna de un 26%, 28% y hasta un 38%, o en su defecto, mantuvieron la misma tasa que el hormigón patrón (0%). Esto refleja que, bajo ciertas condiciones empíricas, las fibras logran refinar la microestructura fina y densificar el gel C-S-H. Sin embargo, este comportamiento se invirtió casi por completo en la Campaña Durabilidad II. Para la misma dosificación, gran parte de las probetas exhibieron incrementos perjudiciales en su tasa de absorción secundaria, alcanzando variaciones desfavorables de -10%, -16% y hasta -38% respecto al hormigón de control.

Ante esta evidente dualidad de los datos empíricos entre ambas tablas, carece de sustento estadístico y técnico afirmar que la incorporación de NFC garantice un efecto inherentemente estable o una reducción constante en la permeabilidad de los poros finos. Por el contrario, la coexistencia de resultados opuestos confirma que la conformación de la microestructura interna en matrices dopadas con nanomateriales es extremadamente vulnerable a la variabilidad experimental intercolada. La drástica disminución de la docilidad en estado fresco inducida por la alta retención de agua de las nanofibras dificulta severamente la consolidación mecánica del hormigón. Consecuentemente, pequeñas deficiencias en la energía de compactación aplicada en una campaña respecto a otra generan redes de microporosidad conectada que facilitan el transporte de fluidos a largo plazo e incrementan la tasa de absorción secundaria.

En síntesis, los resultados demuestran que el aditivo de celulosa no actúa como un impermeabilizante capilar infalible de manera autónoma. Sus potenciales beneficios teóricos de refinamiento a nivel nanométrico quedan estrictamente condicionados a la variabilidad en la consolidación física de la matriz, reafirmando que, para lograr una red de poros finos uniformemente densa en todas las coladas, es imperativo implementar un control estricto sobre la energía de compactación que logre contrarrestar la severa pérdida de trabajabilidad inducida por las fibras.

4.7. Conclusiones

A partir de los resultados experimentales expuestos y analizados en este capítulo, se establecen las siguientes conclusiones respecto al comportamiento del hormigón con adición de nanofibras de celulosa (NFC):

En estado fresco de la mezcla la incorporación de NFC redujo drásticamente la docilidad de estas en comparación al hormigón patrón, llegando a generar asentamientos nulos en el cono de Abrams con dosificaciones del 0,1%. Esta severa pérdida de trabajabilidad evidencia la alta capacidad hidrofílica y la gran superficie específica de las nanofibras, las cuales retienen fuertemente el agua de amasado libre. Este fenómeno reológico es el factor crítico que dificulta la posterior consolidación y compactación mecánica del material en los moldes.

En cuanto el comportamiento mecánico se comprobó que la dosificación óptima correspondiente a NFC de tamaño grande (TG) al 0,05% logró incrementos empíricos en la resistencia a la compresión de hasta un 17,6% a los 28 días. No obstante, se registró una notable variabilidad intercolada. El aumento resistente se justifica por un mecanismo de refuerzo físico-mecánico a microescala que logra sobreponerse al déficit de hidratación química, aunque sus beneficios macroscópicos dependen estrictamente de las condiciones de homogeneización de cada amasada.

La evaluación termodinámica del grado de hidratación (DOH) mediante el ensayo de pérdida por ignición (LOI) refutó la premisa de que las NFC garanticen de forma inherente un curado interno químico continuo. Las fluctuaciones intercoladas y las variaciones negativas (que alcanzaron hasta un -8,1% respecto al patrón) demostraron que la alta afinidad de la celulosa por el agua genera una fuerte

competencia por el fluido durante el mezclado; las fibras pueden retener el agua en su estructura en lugar de cederla, interrumpiendo localmente la formación de geles C-S-H.

El análisis de la permeabilidad mediante la sorptividad inicial y secundaria arrojó resultados opuestos entre las distintas campañas de confección (con reducciones de absorción del 38% frente a incrementos perjudiciales del 38%), además de una pronunciada pérdida de linealidad ($R^2 < 0.96$) en los primeros minutos de exposición. Estas discrepancias confirman que el aditivo no actúa como un impermeabilizante autónomo. Por el contrario, los incrementos en la tasa de absorción y la porosidad secundaria se atribuyen directamente a deficiencias en la energía de compactación, derivadas de la drástica caída de docilidad de la mezcla en estado fresco.

En síntesis, los resultados experimentales demuestran que las NFC poseen un alto potencial de refuerzo estructural, pero su desempeño empírico a nivel capilar y termodinámico es inestable. El éxito de esta adición queda estrictamente condicionado a la implementación de protocolos de amasado y compactación de alta energía que logren contrarrestar los problemas de trabajabilidad inducidos por el aditivo.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

El presente estudio permitió evaluar la influencia de la incorporación de nanofibras de celulosa (NFC) recicladas en el comportamiento del hormigón, considerando sus propiedades en estado fresco, su desempeño mecánico y su durabilidad. A partir del análisis crítico de los resultados experimentales, se concluye en primer lugar que la incorporación de NFC produce una reducción drástica en la trabajabilidad del hormigón, llegando a generar asentamientos nulos en el cono de Abrams para dosificaciones del 0,1%. Este fenómeno reológico se atribuye a la extrema hidrofiliidad y gran área superficial específica de las nanofibras, las cuales secuestran el agua libre de amasado y forman una red tridimensional que dificulta severamente la consolidación mecánica y la adecuada compactación de la mezcla en los moldes.

En estrecha relación con esta retención de fluido, la evaluación termodinámica para estimar el grado de hidratación (DOH) mediante el ensayo de Pérdida por Ignición (LOI) arrojó resultados altamente variables y, en gran medida, variaciones negativas que alcanzaron hasta un -8,1% respecto al hormigón patrón. Esta fluctuación refuta la hipótesis de que la NFC garantice de manera inherente un curado interno químico continuo. Por el contrario, la alta afinidad de la celulosa por el agua genera una fuerte competencia por el fluido durante el mezclado; las fibras retienen el agua en sus enlaces en lugar de cederla gradualmente al cemento anhidro, interrumpiendo localmente la formación de geles C-S-H y evidenciando que la efectividad del curado interno es inestable frente a la variabilidad experimental de cada amasada.

A pesar de este déficit evidenciado en la hidratación química, el desempeño mecánico de las mezclas demostró incrementos empíricos en la resistencia a la compresión de hasta un 17,6%, específicamente al emplear dosificaciones de NFC de tamaño grande (TG) al 0,05%. Esta aparente contradicción se explica debido a que el mecanismo de acción predominante de las NFC es físico-mecánico. Las fibras que logran dispersarse adecuadamente actúan como un andamiaje tridimensional que puentea microfisuras y disipan la energía de fractura mediante la fricción generada por su extracción. Este robusto refuerzo a microescala logra compensar y sobreponerse a la falta de hidratación química, aunque la alta dispersión de resultados entre las distintas campañas demuestra que este beneficio estructural es altamente sensible a las variaciones en la homogeneización intercolada.

Por otro lado, la evaluación de la durabilidad mediante los ensayos de absorción capilar arrojó resultados contrapuestos entre campañas —con reducciones de permeabilidad secundaria del 38% frente a incrementos del 38%— y una notable pérdida de linealidad en los primeros minutos de exposición al agua ($R^2 < 0,96$). Estos datos confirman que la NFC no actúa como un impermeabilizante capilar infalible por el solo hecho de ser incorporada. Las deficiencias en la permeabilidad registradas se atribuyen de manera directa a los problemas de compactación inducidos por la baja docilidad del estado fresco; al no poder consolidar adecuadamente una mezcla tan rígida mediante vibrado estándar, se generan redes de microporosidad conectada que facilitan el transporte de fluidos a largo plazo. En consecuencia, el potencial de densificación nanométrica de las fibras queda estrictamente condicionado a la calidad de la consolidación física de la matriz.

En síntesis, el uso de NFC de tamaño grande recicladas en dosificaciones restrictivas del 0,05% se presenta como una alternativa viable e innovadora para el refuerzo físico-mecánico del hormigón, promoviendo simultáneamente la economía circular en la industria de la construcción. Sin embargo, para que su aplicación a escala industrial sea exitosa y no comprometa la durabilidad estructural por falta de compactación, resulta imperativo el uso de aditivos superplastificantes de alto rango que contrarresten la severa demanda de agua de las fibras.

Como líneas de investigación futuras, se sugiere estandarizar protocolos de mezclado de alta energía, evaluar reológicamente la viscosidad plástica de las matrices dopadas con NFC, y realizar estudios microestructurales directos —como microscopía electrónica de barrido (SEM)— que permitan visualizar in situ el mecanismo de puenteo de fisuras y la distribución real de la red de poros finos.

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.
nm	=	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”.
TP	=	Fibra de celulosa tipo “pequeña”.
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

- Albornoz-Palma, G., Betancourt, F., Teixeira, R., Chinga-Carrasco, G., y Pereira, M. (2020). *Relationship between rheological and morphological characteristics of Carbohydrate Polymers*, 230.
- American Concrete Institute. (2022). *Selecting Proportions for Normal Density and High Density Concrete - Guide (ACI 211.1)*. Farmington Hills, MI: ACI.
- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017). *Standard method of test for bulk specific gravity (Gmb) of compacted asphalt mixtures using paraffin-coated specimens (AASHTO T 275)*. AASHTO.
- Aroca, P. P. (2025). Evaluación de la influencia de nanofibras de celulosa como aditivo en hormigón y mortero. Memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- ASTM International. (2020). *Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes (ASTM C1585-20)*. ASTM International.
- Bentz, D. P. (2007). Internal Curing of High-Performance Blended Cement Mortars. *ACI Materials Journal*, 104(4), 408-414.
- Cifuentes, W. A. (2024). Evaluación de aditivo de nanofibras de celulosa en las propiedades y curado interno en morteros. Memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- De Solminihaç, H., & Thenoux, G. (2020). *Procesos y técnicas de construcción* (7.^a ed.). Ediciones UC.
- Espinoza Hijazin, G. J. (2010). *Extending internal curing to concrete mixtures with W/CM higher than 0.42*. Tesis de Magíster. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

- Hisseine, O. A., Omran, A. F., y Tagit-Hamou, A. (2018). *Influence of Cellulose Filaments on Cement Paste and Concrete*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(6).
- Hisseine, O. A., Wilson, W., Tagnit-Hamou, A., y otros. (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.
- Instituto Nacional de Normalización [INN]. (1979). NCh 1223 Of.77: Áridos para morteros y hormigones – Determinación del material fino menor a 0.080mm. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización [INN]. (2009a). NCh165:2009 Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización [INN]. (2009b). NCh1019:2009 Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización [INN]. (2009c). NCh1239:2009 Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización [INN]. (2009d). NCh1017:2009 Hormigón - Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización [INN]. (2009e). NCh1037:2009 Hormigón - Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2010). Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las densidades real y neta (NCh 1117:2010).

- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2016). Hormigón – Requisitos generales (NCh 170:2016).
- Instituto Nacional de Normalización [INN]. (2019a). NCh150:2019 Cemento - Determinación de la finura por tamizado. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización [INN]. (2019b). NCh151:2019 Cemento - Método de determinación de la consistencia normal. Santiago, Chile.
- Instituto Nacional de Normalización [INN]. (2019c). NCh152:2019 Cemento - Método de determinación del tiempo de fraguado. Santiago, Chile
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2021). Cemento – Terminología, clasificación y requisitos generales (NCh 148:2021).
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2022). Hormigón y mortero – Agua de amasado (NCh 1498:2022).
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2024). Áridos para morteros y hormigones – Requisitos (NCh 163:2024).
- Lehne, J., y Preston, F. (2018). *Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. Chatham House.
- Mondal, S. (2017). *Preparation, properties and applications of nanocellulosic materials. Carbohydrate Polymers*, 163, 301–316.
- Muñoz, R. I. (2025). Evaluación de la resistencia a la corrosión en probetas de hormigón armado confeccionado con nanofibras de celulosa a través de un ensayo de corrosión acelerada. Memoria de título para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

- Nasir, M., Aziz, M. A., Zubair, M., Ashraf, N., Hussein, T. N., Allubli, M. K., Manzar, M. S., Al-Kutti, W., y Al-Harthi, M. A. (2022). *Engineered cellulose nanocrystals-based cement mortar from office paper waste: Flow, strength, microstructure and termal properties*. *Journal of Building Engineering*, 51 (104345), 1-16.
- Neville, A. M. (2012). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Onuaguluchi, O., & Banthia, N. (2016). *Plant-based natural fiber reinforced cement composites*. *Cement and Concrete Composites*, 68, 96–108.
- Scrivener, K. L., y Nonat, A. (2011). *Hydration of cementitious materials, present and future*. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 651–665.
- Taus, V. L. (2003). *Determinación de la absorción capilar en hormigones elaborados con agregados naturales y reciclados*. *Ciencia y Tecnología del Hormigón*.
- Withana, H., Rawat, S., & Zhang, Y.-X. (2024). *Effect of nanocellulose on mechanical properties of cementitious composites – A review*. *Advanced Nanocomposites*, 1(1), 201–216.

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

El tema desarrollado se vincula con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 9, 11 y 12, al abordar una problemática relevante para la industria de la construcción desde una perspectiva de innovación, sostenibilidad y eficiencia en el uso de recursos. El estudio evalúa la incorporación de nanofibras de celulosa a partir del reciclaje de sacos de cemento como adición en hormigón, contribuyendo al desarrollo de soluciones técnicas que permiten mejorar el desempeño de materiales de construcción. Respecto al ODS 9, el trabajo aporta al desarrollo de infraestructura más eficiente e innovadora, al analizar el efecto de materiales alternativos sobre propiedades mecánicas, de hidratación y durabilidad del hormigón. En relación con el ODS 11, este se aborda al contribuir indirectamente a la construcción de ciudades más sostenibles, mediante el uso de materiales reciclados que aportan a tener materiales con mayor vida útil, lo que permite reducir intervenciones de mantenimiento y mejorar la resiliencia de la infraestructura urbana. Finalmente, en el marco del ODS 12 el estudio promueve prácticas de producción responsables mediante la valorización de residuos industriales, contribuyendo a la reducción de desechos y al uso más eficiente de los recursos materiales en un sector de alto impacto ambiental.

ANEXO 4.2 CURVAS DE ABSORCIÓN CAPILAR

A continuación, se adjuntan las curvas de absorción capilar correspondientes a las campañas de ensayo de Durabilidad I y II, en las que se evalúa la sorptividad inicial y secundaria por probeta y finalmente se presenta un gráfico comparativo entre los promedios de cada nomenclatura y el Patrón.

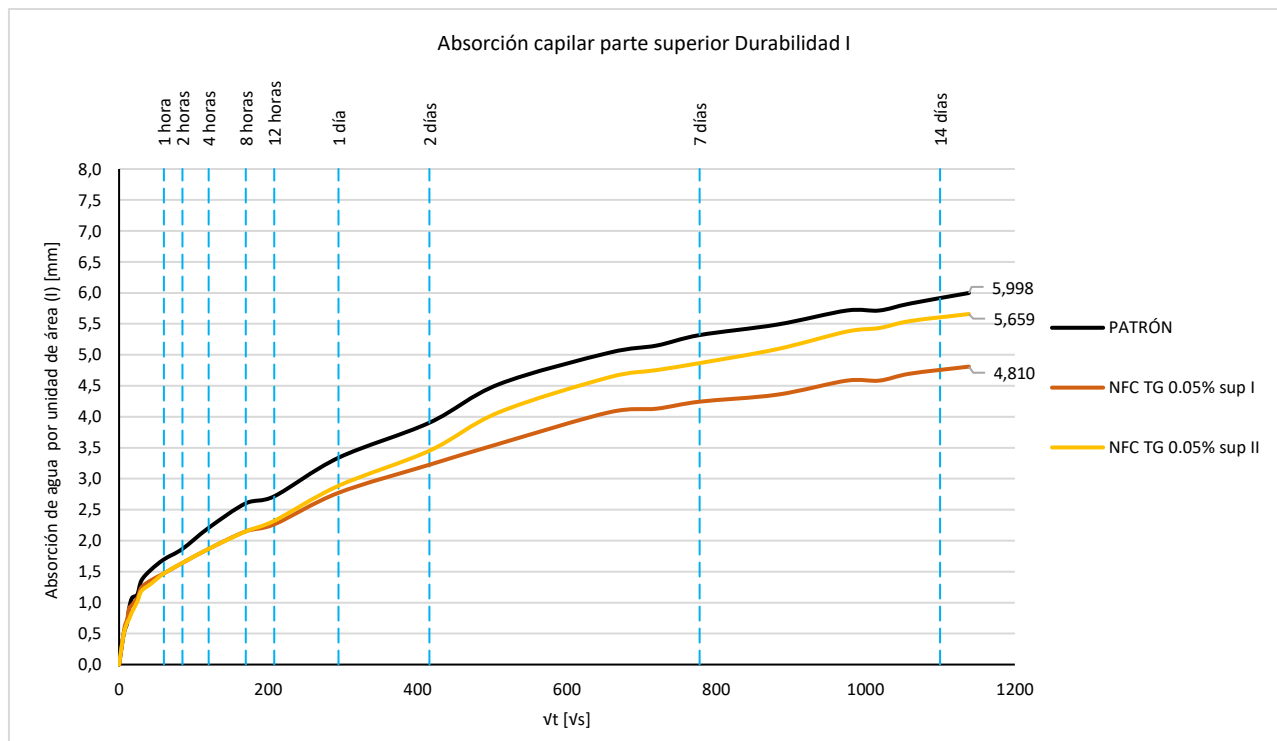


Figura A.4.0.1 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte superior y patrón Durabilidad I

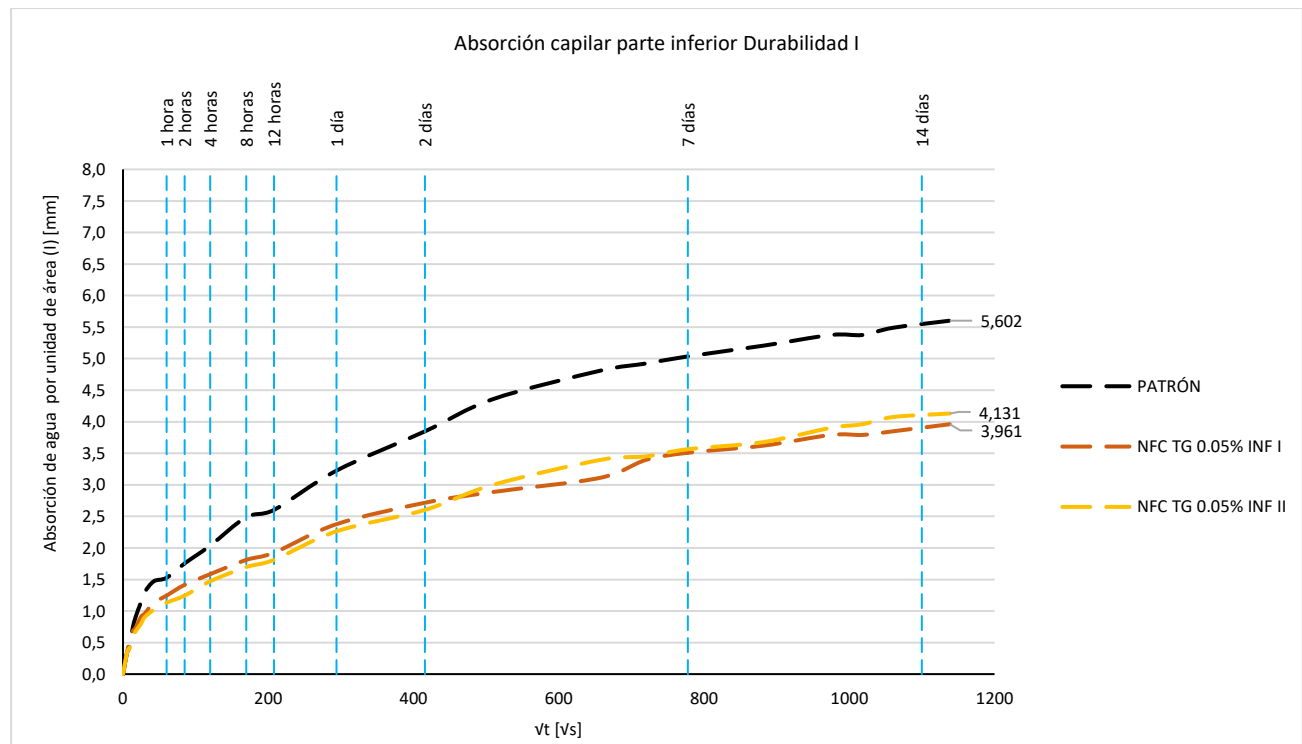


Figura A.4.0.2 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte inferior y patrón Durabilidad I

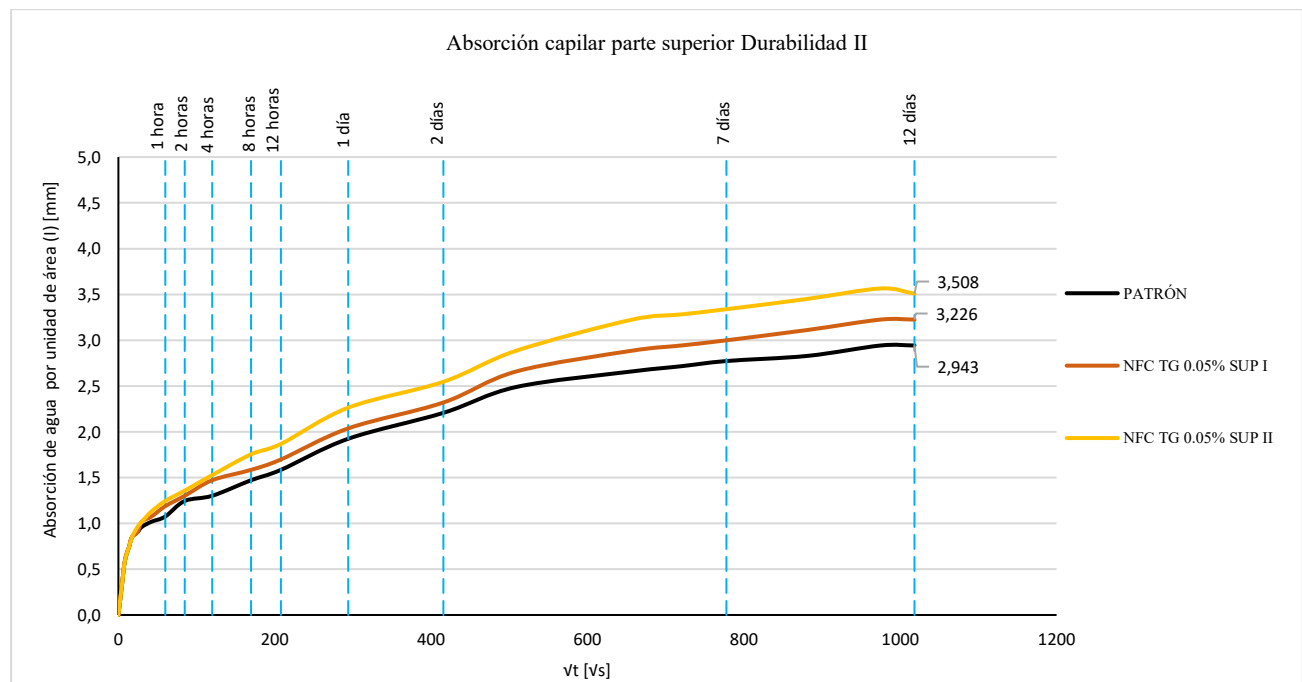


Figura A.4.0.3 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte superior y patrón Durabilidad II

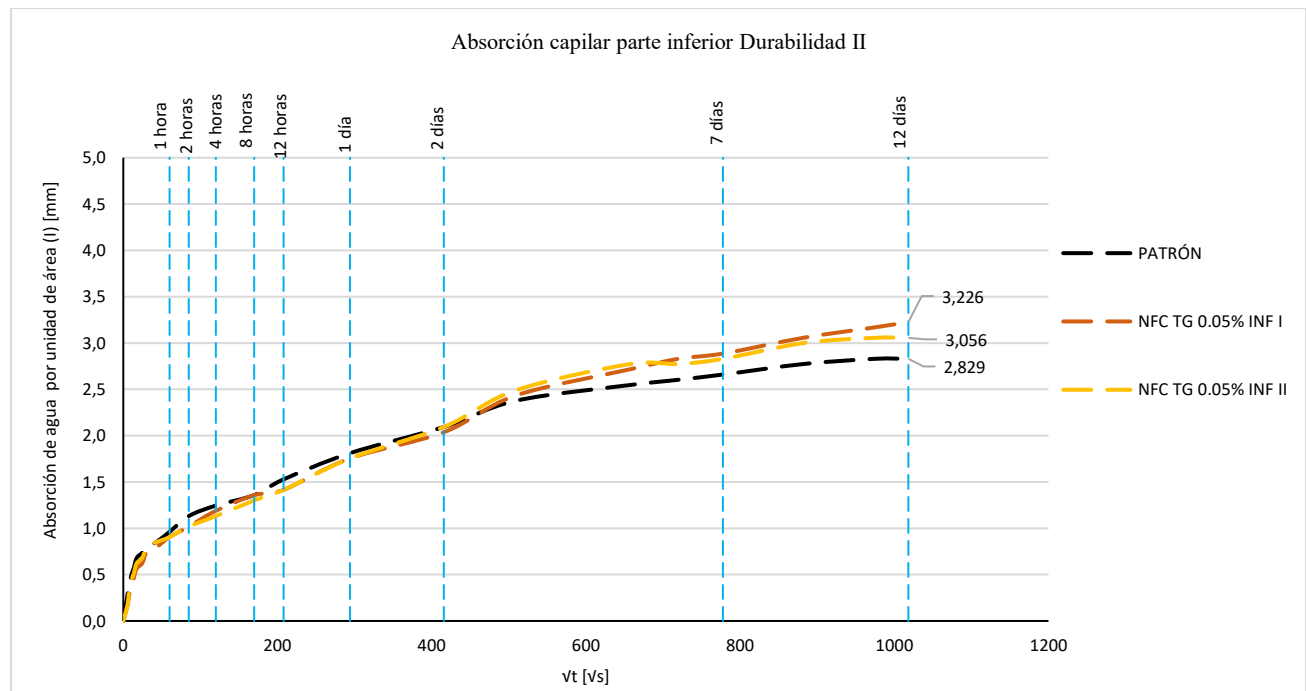


Figura A.4.0.4 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte inferior y patrón Durabilidad II

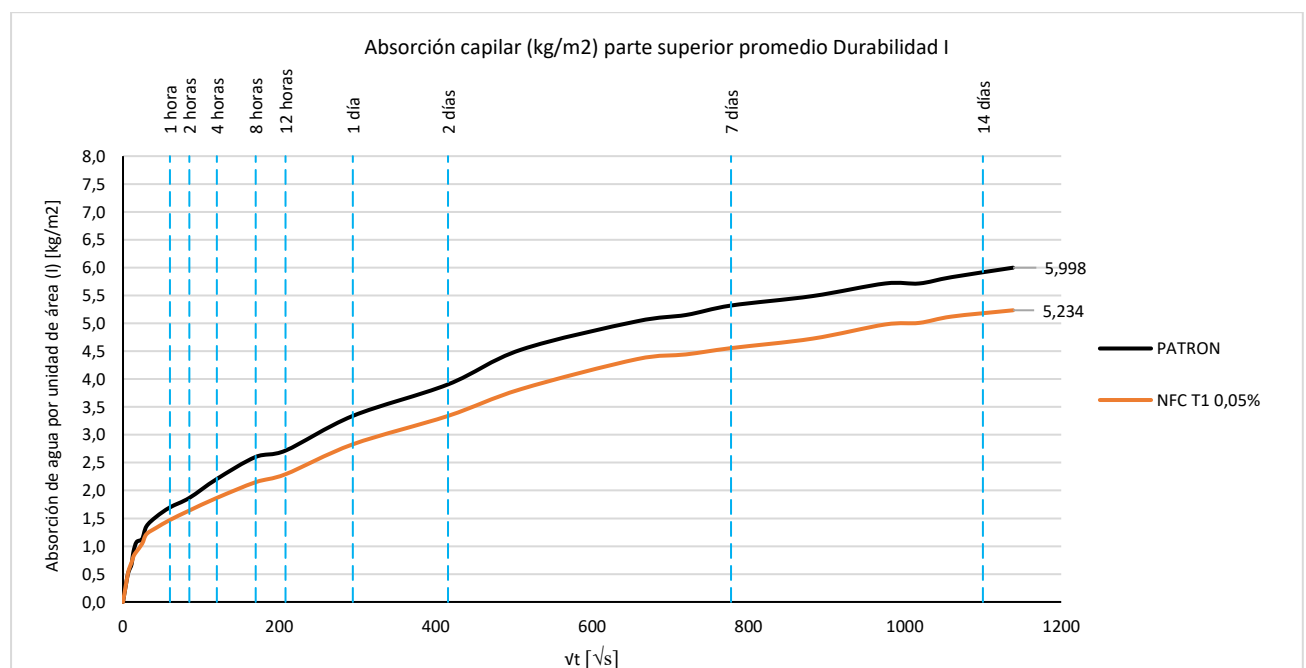


Figura A.4.0.5 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte superior promedio y patrón Durabilidad I

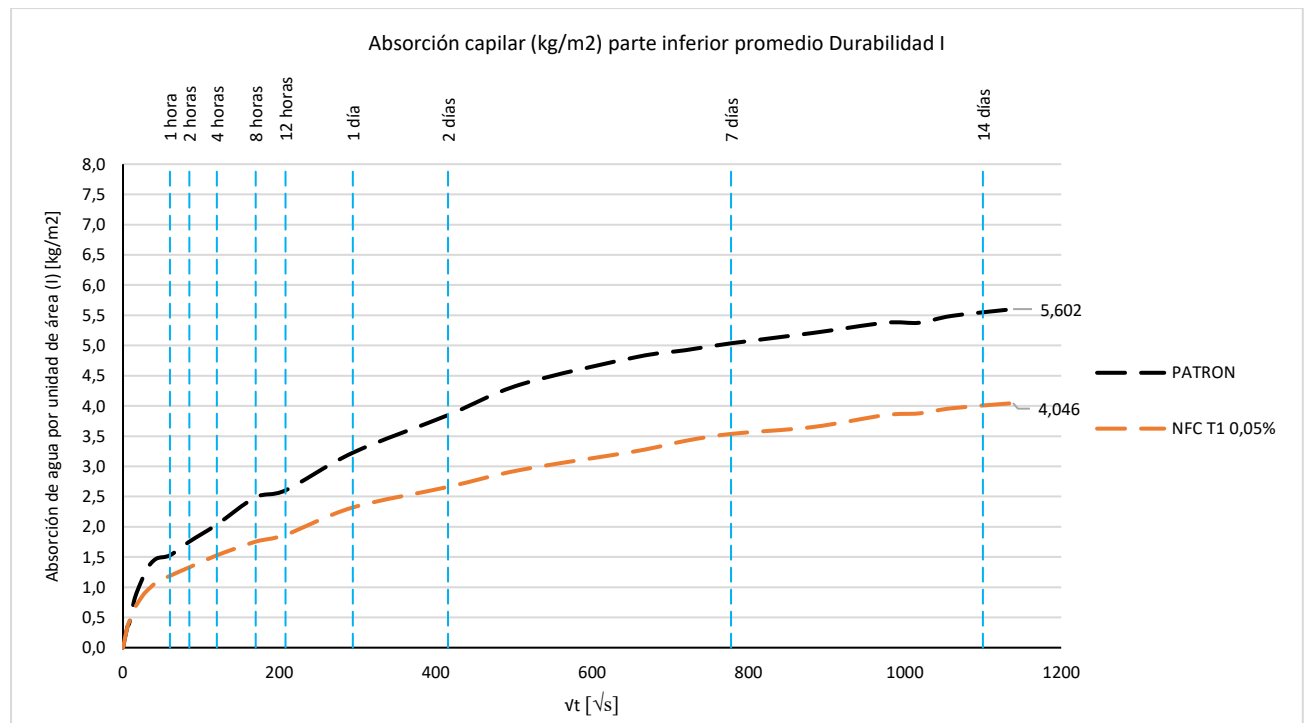


Figura A.4.0.6 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte inferior promedio y patrón Durabilidad I

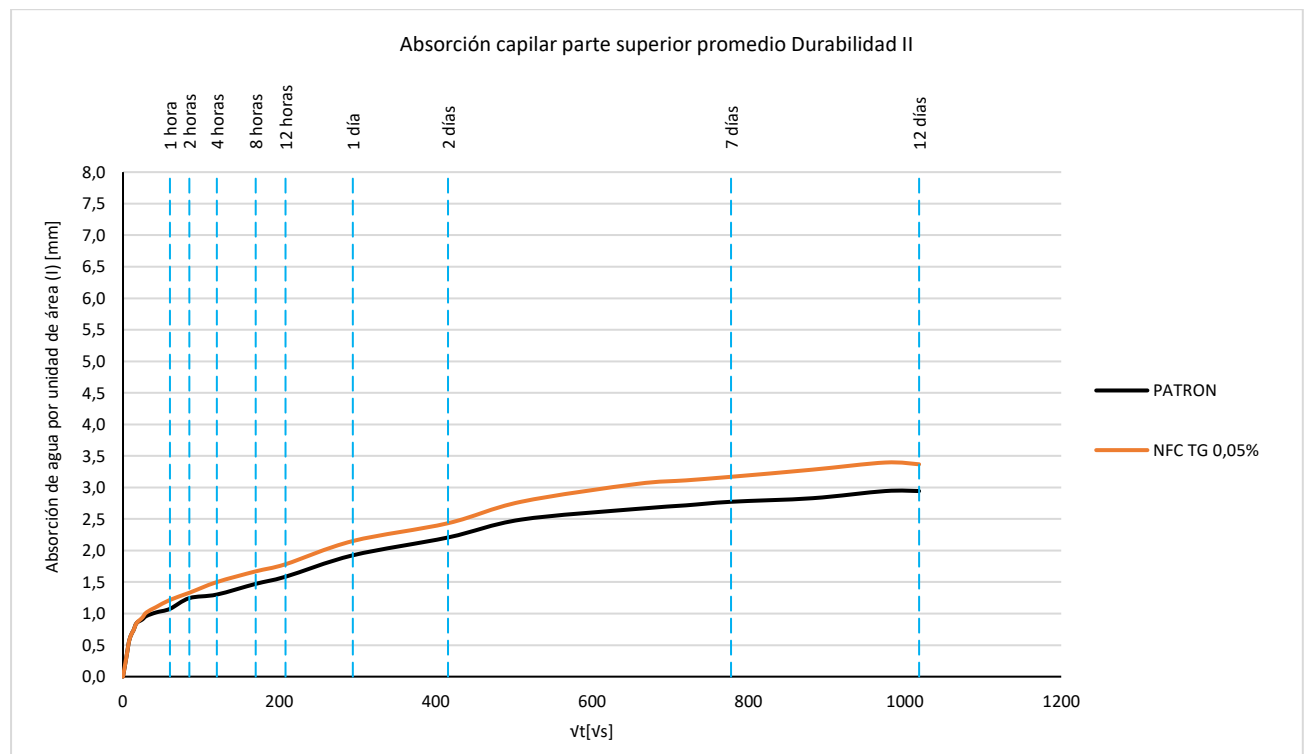


Figura A.4.0.7 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte superior promedio y patrón Durabilidad II

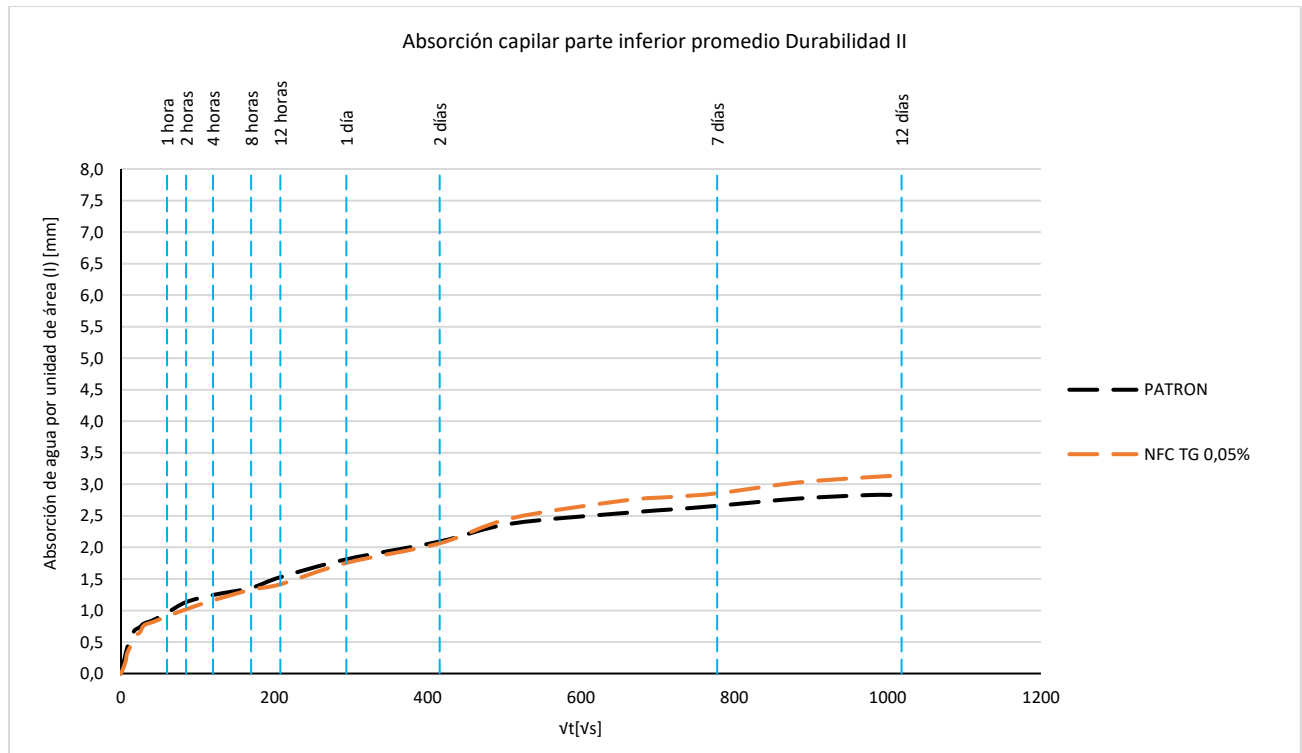


Figura A.4.0.8 Curva de absorción capilar de hormigón con adición de NFC, comparación parte inferior promedio y patrón Durabilidad II

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Benjamín Andrés Andía Vargas
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

El hormigón enfrenta desafíos de durabilidad por fisuración temprana, mientras la industria cementera busca mayor sostenibilidad. Este estudio evalúa el comportamiento mecánico y físico del hormigón al incorporar nanofibras de celulosa (NFC) recicladas de sacos de cemento.

Se ensayaron mezclas con NFC de tamaño grande (TG) y pequeño (TP) al 0,05% y 0,1% respecto al cemento. En estado fresco, las NFC redujeron drásticamente la docilidad, dificultando la compactación. Termodinámicamente, los ensayos arrojaron grados de hidratación negativos (hasta -8,1%), evidenciando que las fibras retienen el agua de amasado e interrumpen localmente la reacción química del cemento.

Sin embargo, la dosificación óptima (NFC-TG al 0,05%) incrementó la resistencia a compresión en 17,6%. Se concluye que este éxito radica en un refuerzo físico-mecánico: las nanofibras puentean microfisuras a microescala y disipan energía de fractura, compensando el déficit de hidratación.

Finalmente, la absorción capilar mostró una alta variabilidad intercolada, demostrando que la impermeabilidad de la red de poros finos depende críticamente de superar los problemas de compactación generados por la rigidez de la mezcla.

Se concluye que las NFC son viables para el refuerzo estructural, pero su aplicación requiere el uso de aditivos superplastificantes para garantizar la durabilidad.