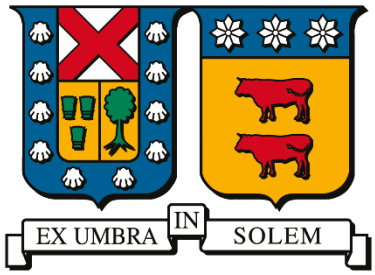
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO - CHILE



EFECTO DE LA EDAD DE CARGA EN EL COMPORTAMIENTO AL CREEP DE HORMIGONES PRE-AGRIETADOS REFORZADOS CON MACROFIBRAS SINTÉTICAS

Memoria de titulación presentada por

FELIPE SEBASTIÁN TORRES MOLINA

Como requisito para optar al título de

CONSTRUCTOR CIVIL

Profesor guía

SERGIO CARMONA MALATESTA

2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE

MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

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

Título del trabajo: **EFECTO DE LA EDAD DE CARGA EN EL COMPORTAMIENTO AL CREEP DE HORMIGONES PRE-AGRIETADOS REFORZADOS CON MACROFIBRAS SINTÉTICAS**

Nombre del candidato(a): **Felipe Sebastián Torres Molina**

Carrera / Grado: **Construcción Civil**

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

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

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

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

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

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

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

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

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

_____

_____

_____

4.- FIRMAS

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



Fecha: __9 DE NOVIEMBRE DE 2026_____ **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):



Fecha: ____9 DE NOVIEMBRE DE 2026____ **Firma:** _____

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

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mis padres, Elizabeth y Jaime, por cada esfuerzo realizado para brindarme la oportunidad de estudiar en una gran universidad, aun estando lejos de mi hogar.

A mi familia, Olga, Diego, Daniel y Lilian, por nunca dudar de mis capacidades y por estar siempre presentes, ofreciéndome una palabra de aliento sin importar las circunstancias.

A Camila, por ser mi compañera de vida y llenar de alegría cada día.

A Martín por su lealtad.

A Nahuel por su amistad genuina.

Sin dudas, este logro es de todos.

DEDICATORIA

"A mis padres, por su esfuerzo incombustible
A mi familia y amigos, por su apoyo incondicional
A Camila, por ser mi fiel compañera
A Dios y a Lilian, por guiarme a lo largo de este camino"

RESUMEN

La presente memoria de título evalúa el efecto de la edad de carga en el comportamiento al *creep* de hormigones reforzados con macrofibras sintéticas (HRF) previamente pre-agrietados, con la finalidad de comparar empíricamente la variación en el comportamiento estructural entre una muestra ensayada a 28 días y otra con un año extra de curado.

Para llevar a cabo este estudio, se elaboró un hormigón reforzado con 7 kg/m^3 de macrofibras sintéticas BarChip48, a partir de la cual se confeccionaron dos grupos de probetas prismáticas: MSFRC-28 y MSFRC-365. Posteriormente, se ensayaron ambos grupos de acuerdo con los lineamientos de la norma EN 14651 y las recomendaciones del Comité Técnico RILEM TC 261-CCF: MSFRC-28 fue cargado a los 28 días de curado, mientras que MSFRC-365 se mantuvo en un proceso de curado extendido durante un año. Ambos grupos fueron pre-agrietados hasta alcanzar una apertura de boca de fisura (CMOD) de 0,5 mm, se descargaron y se dejaron en reposo durante 7 días, posteriormente, se sometieron a una carga constante equivalente al 50% de su resistencia residual durante un periodo de 210 días bajo una configuración de flexión de cuatro puntos (4PBT).

Los resultados demostraron que, durante el pre-agrietamiento y la descarga inicial, ambos grupos presentaron un comportamiento prácticamente idéntico en su rigidez elástica y recuperación. No obstante, durante el ensayo de *creep*, la mezcla MSFRC-365 alcanzó una estabilización de apertura de boca de fisura significativamente más rápida (al quinto día, con un CMOD de 0,27 mm) respecto de MSFRC-28 (al día cincuenta, con un CMOD de 0,37 mm), registrando un CMOD final a los 210 días un 26% menor (0,315 mm frente a 0,397 mm). Tras la fase de estabilización inicial, ambas mezclas exhibieron tasas de deformación diaria similares y asintóticas entre los 90 y 210 días (0,133 μm/día para MSFRC-28 y 0,141 μm/día para MSFRC-365).

Por lo anterior, se concluye que un mayor tiempo de curado favorece en el desarrollo de la interfaz fibra-matriz y mejora el anclaje mecánico otorgado por la geometría de la fibra, reduciendo el deslizamiento inicial y la apertura inmediata de la fisura, garantizando una respuesta predecible y un control efectivo de las deformaciones diferidas en condiciones de servicio a largo plazo.

ABSTRACT

This thesis evaluates the effect of loading age on the creep behavior of pre-cracked synthetic macrofiber-reinforced concrete (FRC), aiming to empirically compare the variation in structural behavior between specimens tested at 28 days and those subjected to an extra year of curing.

To carry out this study, a concrete mix reinforced with 7 kg/m^3 of BarChip48 synthetic macrofibers was produced, from which two groups of prismatic specimens were manufactured: MSFRC-28 and MSFRC-365. Subsequently, both groups were tested according to the guidelines of the EN 14651 standard and the recommendations of RILEM Technical Committee TC 261-CCF: MSFRC-28 was loaded after 28 days of curing, whereas MSFRC-365 underwent an extended curing period of one year. Both groups were pre-cracked until reaching a Crack Mouth Opening Displacement (CMOD) of 0.5 mm, unloaded, and left to rest for 7 days. Afterward, they were subjected to a sustained constant load equivalent to 50% of their residual strength over a period of 210 days under a four-point bending test (4PBT) configuration.

The results showed that, during pre-cracking and initial unloading, both groups exhibited virtually identical behavior in terms of elastic stiffness and recovery. However, during the creep test, the MSFRC-365 mix achieved a significantly faster stabilization of the crack opening (on the 5th day, with a CMOD of 0.27 mm) compared to MSFRC-28 (on the 50th day, with a CMOD of 0.37 mm), registering a final CMOD at 210 days that was 26% lower (0.315 mm versus 0.397 mm). Following the initial stabilization phase, both mixes exhibited similar and asymptotic daily deformation rates between 90 and 210 days (0.133 μm/day for MSFRC-28 and 0.141 μm/day for MSFRC-365).

Therefore, it is concluded that a longer curing period favors the development of the fiber-matrix interface and enhances the mechanical anchorage provided by the fiber geometry, reducing initial slip and immediate crack opening while ensuring a predictable response and effective control of time-dependent deformations under long-term service conditions.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS 2
DEDICATORIA 3
RESUMEN 4
ABSTRACT 5
GLOSARIO 7
1. INTRODUCCIÓN 8
2. OBJETIVO 9
2.1 OBJETIVO GENERAL 9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 9
3. MARCO TEÓRICO – COMPORTAMIENTO DE LOS HRF BAJO EFECTOS DE CARGA SOSTENIDA EN EL TIEMPO 10
4. MATERIALES ENSAYADOS 13
5. DESARROLLO EXPERIMENTAL 17
5.1 PRE-AGRIETAMIENTO 17
5.2 RAMA DE DESCARGA 21
5.3 CREEP 24
6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS 31
7. CONCLUSIONES 34
8. BIBLIOGRAFÍA 37

GLOSARIO

- HRF: Hormigón reforzado con fibras.
- Creep: Incremento progresivo de la deformación en un material sometido a una carga mecánica sostenida y constante a lo largo del tiempo. En el hormigón, representa la deformación diferida ante esfuerzos prolongados.
- Recuperación elástica diferida: Proceso de reversión gradual de parte de la deformación elástica tras el retiro de una carga sostenida. Ocurre de manera asintótica en el tiempo debido a la relajación de las tensiones internas del sistema.
- Resistencia Residual a la tracción por flexión: Tensión nominal calculada en la sección agrietada (o entallada) del prisma, asumiendo una distribución lineal de tensiones. Representa la capacidad del HRF para transferir cargas tras la rotura de la matriz.
- Tenacidad: Capacidad de un material para absorber energía y deformarse plásticamente antes de alcanzar la rotura.
- CMOD: desplazamiento de la apertura de boca de la grieta.
- $CMOD_P$: CMOD máximo alcanzado en la etapa previa al agrietamiento.
- $CMOD_{PRI}$: CMOD residual medido inmediatamente después de la descarga luego del pre-agrietamiento.
- DAS: sistema de adquisición de datos
- M: valor del momento de flexión de acuerdo con EN 14651.
- f_R: tensión aplicada durante la etapa de creep.
- F_c: carga aplicada a la muestra durante la etapa de creep.
- f_L: resistencia residual a la tracción por flexión en el límite de proporcionalidad (LOP).
- $f_{R,1}$: resistencia residual a la tracción por flexión correspondiente a CMOD = 0,5 mm.
- $f_{R,2}$: resistencia residual a la tracción por flexión correspondiente a CMOD = 1,5 mm.
- $f_{R,3}$: resistencia residual a la tracción por flexión correspondiente a CMOD = 2,5 mm.
- $f_{R,m}$: promedio de resistencia residual a la tracción por flexión.
- S: desviación estándar de los datos.
- CV: Coeficiente de variación.
- $CMOD_{cd}^{210}$: CMOD residual registrado tras 210 días de ensayo creep.
- b: corresponde al ancho de la viga (150 mm).
- h: corresponde a la altura de la viga (125 mm).

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de grandes infraestructuras viales ha impulsado el uso de soluciones constructivas eficientes y seguras. Un ejemplo es el Proyecto Américo Vespucio Oriente (AVO), en la ciudad de Santiago de Chile. Esta obra contempla una autopista subterránea de 5,2 km de longitud, con una gran inversión económica bajo la gestión del Ministerio de Obras Públicas. El proyecto incluye la construcción de túneles situados hasta a 40 metros de profundidad y excavados bajo los principios del Nuevo Método Austríaco de Túneles (NATM).

En el marco del NATM, el sostenimiento se logra mediante un revestimiento primario de hormigón proyectado (shotcrete) reforzado con macrofibras, con una resistencia a la compresión de 25 MPa, complementado con armaduras de acero según las condiciones del terreno.

A pesar de las ventajas operativas, el uso de fibras sintéticas genera interrogantes respecto a su comportamiento bajo cargas sostenidas a largo plazo. Según diversos autores, el hormigón reforzado con macrofibras sintéticas puede experimentar deformaciones dependientes del tiempo más pronunciadas que aquellas observadas en fibras de acero, fenómeno conocido como creep. En estructuras críticas como los revestimientos de túneles, donde el sostenimiento es sometido a carga a temprana edad y debe mantener su integridad durante décadas, el ensanchamiento progresivo de las fisuras puede comprometer tanto la capacidad de servicio como la durabilidad del sistema.

Aunque el desempeño mecánico a corto plazo de las mezclas reforzadas con macrofibras sintéticas esté ampliamente documentado, existe una diferencia en el conocimiento sobre su evolución en periodos extensos bajo carga sostenida. Como señalan Vrijdaghs et al. (2020), la respuesta viscosa del polímero y el posible deslizamiento en la interfaz fibra-matriz son factores determinantes que deben cuantificarse para garantizar diseños estructurales seguros.

En consecuencia, el objetivo de esta investigación es evaluar el comportamiento a largo plazo de mezclas de hormigón proyectado reforzado con fibras sintéticas “BarChip48”. El estudio se centra en el análisis de la evolución de la apertura de la boca de fisura (CMOD) bajo carga sostenida, siguiendo las recomendaciones del comité técnico RILEM TC 261-CCF. Durante un periodo de 210 días, se pretende cuantificar el efecto provocado por el fenómeno creep y determinar coeficientes de creep que permitan validar el desempeño de estas mezclas en aplicaciones de túneles de alta exigencia, proporcionando datos empíricos para el diseño de infraestructuras subterráneas.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GENERAL

- Evaluar las diferencias en la respuesta al creep de hormigones pre-agrietados reforzados con macrofibras sintéticas sometidos a carga sostenida a dos edades de carga: 28 días y 1 año.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Cuantificar la evolución de la apertura de fisura bajo carga sostenida en probetas pre-agrietadas y cargadas a 28 días y a 1 año.
- Comparar la respuesta frente al creep obtenida para ambas edades de carga, considerando la deformación instantánea y la evolución temporal de la apertura de fisura.
- Caracterizar la respuesta post-fisuración del hormigón reforzado con macrofibras sintéticas a 28 días y a 1 año mediante ensayos de flexotracción según EN 14651, y analizar su posible relación con las diferencias observadas en la respuesta al creep.

3. MARCO TEÓRICO – COMPORTAMIENTO DE LOS HRF BAJO EFECTOS DE CARGA SOSTENIDA EN EL TIEMPO

El Hormigón Reforzado con Fibras (HRF) es un material compuesto que combina las propiedades de una matriz cementicia convencional con las de un refuerzo activo proporcionado por fibras, cuyo propósito fundamental es modificar la respuesta frágil del hormigón frente a esfuerzos de tracción y otorgarle un comportamiento más dúctil.

El principio fundamental del refuerzo con fibras se activa una vez que la matriz se fisura. En esta etapa, bajo la acción de cargas sostenidas en el tiempo, se manifiesta el fenómeno de creep), que tiende a incrementar el ancho de la fisura. Frente a esto, el material desarrolla el fenómeno conocido como puenteo de fibras en la zona de fisura, mediante el cual las fibras actúan como un mecanismo resistente que conecta ambas caras de la fisura, permitiendo la redistribución y transferencia interna de esfuerzos. Como consecuencia, se evita la ocurrencia de fallas frágiles, permitiendo que los elementos mantengan una resistencia residual y un control efectivo de la apertura de fisuras bajo solicitaciones sostenidas en el tiempo. Cabe destacar que la eficiencia de este mecanismo se encuentra directamente condicionado por la orientación, distribución y compacidad que adopten las fibras dentro de la matriz de hormigón.

El estudio de las deformaciones diferidas a largo plazo resulta indispensable en elementos fisurados, debido a que la incorporación de fibras modifica significativamente la respuesta tradicional del hormigón respecto de sus propiedades viscoelásticas. Una vez producida la fisuración, las fibras pasan a constituir el principal mecanismo resistente frente a esfuerzos de tracción, por lo que su comportamiento bajo cargas sostenidas adquiere una relevancia determinante en el desempeño estructural del elemento. En estas condiciones, el diseño de la matriz fibra-hormigón busca favorecer un mecanismo de deslizamiento progresivo y controlado de las fibras, evitando su rotura y permitiendo una redistribución gradual de esfuerzos a través de la sección fisurada. Este mecanismo contribuye a mantener la capacidad resistente residual y la integridad estructural del elemento durante su vida útil.

En relación con este comportamiento a largo plazo, Del Prete et al. (2022) demostraron experimentalmente que las deformaciones diferidas en hormigones reforzados con fibras tienden a estabilizarse una vez transcurridas las primeras semanas bajo carga sostenida. Dichos resultados evidencian que, a pesar de la naturaleza viscoelástica de ciertos tipos de fibras y de los fenómenos de deterioro que pueden desarrollarse en la interfaz fibra-hormigón, el sistema conserva su capacidad para transferir tensiones residuales durante períodos prolongados, contribuyendo al control de la apertura de fisuras y a la estabilidad mecánica del material.

Asimismo, se ha constatado que el tipo de fibra empleada ya sea metálica o sintética, genera diferencias relevantes en el desempeño del elemento. Debido a la alta resistencia y módulo de elasticidad del acero, la deformación por creep de las fibras en los hormigones reforzados con fibras de acero es baja y el comportamiento general frente al creep está regido por la pérdida de anclaje y el deslizamiento de las fibras sometidas a arrancamiento (Zerbino y Barragan, 2012). Por otro lado, el comportamiento al creep de los hormigones reforzados con macro fibras sintéticas depende del número de fibras que cruzan el plano agrietado (Babafemi et al., 2015), de las propiedades intrínsecas del material del cual están fabricadas las macro fibras sintéticas, del nivel de tensión en el plano fisurado (Vrijdaghs et al., 2020) y de factores externos como la radiación UV, la temperatura y la humedad (Pujadas et al., 2017). Sin embargo, existen limitadas resultados del efecto de la edad del hormigón en la respuesta frente a carga sostenidas de hormigones reforzados con macrofibras sintéticas.

Cuando un elemento de HRF es sometido a un estado de carga sostenida, el incremento progresivo de la apertura de boca de fisura (CMOD) es consecuencia de la acción simultánea de diversos mecanismos que ocurren en la zona fisurada:

- Deformación viscoelástica de la fibra: corresponde a la deformación propia de la fibra producto de la acción de una tensión constante a lo largo del tiempo.
- Deslizamiento en la interfaz fibra-hormigón: la carga sostenida puede provocar una disminución progresiva de la adherencia mecánica, generando el desplazamiento relativo de la fibra respecto de la matriz cementicia.
- Deterioro local: la concentración de tensiones en las zonas de anclaje puede inducir la formación de microfisuras, reduciendo la capacidad de confinamiento y transferencia de esfuerzos de las fibras.

La evolución del fenómeno de fluencia a tracción puede clasificarse en tres etapas dentro de una curva típica deformación-tiempo, tal como se muestra en la Figura 1:

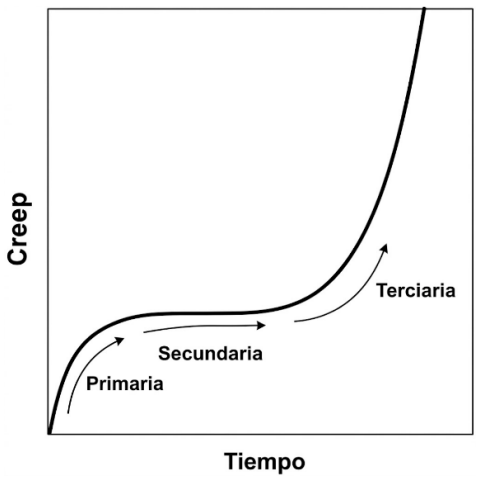


Figura 1. Curva deformación-tiempo descriptiva de la evolución del creep (Kurtz y Balaguru, 2000).

- Fluencia primaria: ocurre inmediatamente después de la aplicación de la carga. Se caracteriza por presentar una elevada tasa de deformación inicial, la cual disminuye gradualmente a medida que las tensiones internas se estabilizan.
- Fluencia secundaria: se caracteriza por una velocidad de deformación baja y constante. Representa el período operativo de las fibras dentro de la zona fisurada, define el comportamiento en condiciones de servicio y la durabilidad de la estructura.
- Fluencia terciaria: corresponde a una etapa en la que la velocidad de apertura del CMOD aumenta de forma acelerada. Esta fase refleja la pérdida de estabilidad del sistema y conduce al colapso estructural debido a la propagación de la fisura.

El inicio y la duración de cada una de estas etapas dependen del esfuerzo aplicado, de la fibra utilizada y de la dosificación incorporada durante la elaboración de la mezcla.

Con el objetivo de caracterizar el comportamiento del HRF sometido a cargas sostenidas y evaluar el efecto del creep sobre su desempeño estructural, el Comité Técnico RILEM TC 261 propone una metodología experimental para vigas pre-agrietadas sometidas a esfuerzos de tracción. Este procedimiento se desarrolla mediante la siguiente secuencia:

- Pre-agrietamiento (0-A-B-C): las vigas son sometidas a un proceso de pre-agrietamiento controlado mediante un ensayo de flexión, de acuerdo con la norma EN 14651, hasta alcanzar un CMOD = 0,5 mm. Luego, las muestras son descargadas y trasladadas a una cámara de reposo durante 7 días. Se representa una condición de servicio en la que la matriz se encuentra fisurada y el refuerzo está en funcionamiento.
- Carga sostenida (creep) (D-E-F): tras el reposo, las muestras son sometidas a esfuerzo constante durante un periodo determinado, con la finalidad de evaluar la evolución de la apertura de fisura y el comportamiento del material.
- Post-creep (G-H-I-J): finalizado el período de carga sostenida, se evalúa el comportamiento residual del HRF mediante la recarga de las probetas, conforme a la norma EN 14651, hasta alcanzar aperturas de CMOD de 1,5 mm, 2,5 mm y 3,5 mm.

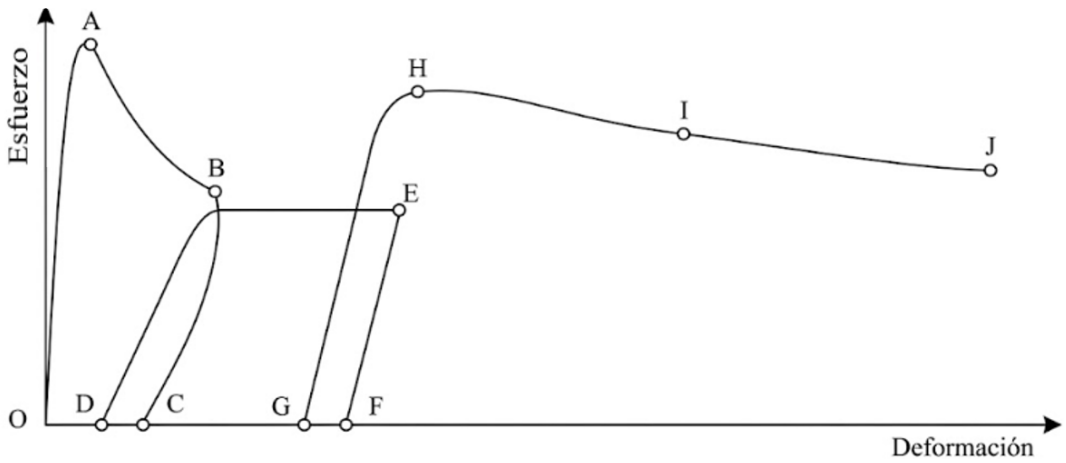


Figura 2. Comportamiento de una muestra tras la ejecución de ensayo de creep.

4. MATERIALES ENSAYADOS

En la presente investigación se evaluaron dos grupos de muestras compuestas por hormigón reforzado con macrofibras, identificados como MSFRC-28 y MSFRC-365. El diseño considera refuerzo consistente en 7 kg/m^3 de macrofibras sintéticas BarChip48 y fue elaborado durante el mes de febrero de 2024 en las instalaciones de la empresa Unicon. En la Tabla 1, se detalla la dosificación utilizada.

Tabla 1. Dosificación de mezclas.

Material	Dosificación kg/m^3
Cemento	425
Agua	210
Gravilla	120
Arena gruesa	1250
Arena fina	147
Aditivo Plastocrete 4	2,0
Aditivo Viscocrete	4,0
Aditivo Microsílice	21
Fibras	7

La Tabla 2 resume las propiedades del hormigón reforzado con macrofibras sintéticas, además, la Figura 3 muestra la ejecución del ensayo de asentamiento de Cono de Abrahams.

Tabla 2. Propiedades de ambas mezclas.

Propiedad	Medición
Asentamiento Cono de Abrahams (mm)	225
Temperatura (°C)	28,3

Dadas las características obtenidas tras el ensayo de asentamiento de Cono de Abrahams, se puede determinar que corresponde a un hormigón del tipo fluido.



Figura 3. Ensayo de asentamiento de Cono de Abrahams.

Para cada grupo de muestras se prepararon 4m³, a partir de los cuales se moldearon 20 vigas normalizadas y 6 probetas cilíndricas para determinar la resistencia a compresión a 28 días.

La Figura 4 (a) y (b) detallan los moldes utilizados, el proceso de elaboración de las vigas prismáticas y el acopio en la planta Unicon.



Figura 4. (a) Moldes utilizados. (b) Elaboración de probetas.

Una vez vertida la mezcla en los moldes, las muestras permanecieron en la planta de hormigón durante los primeros 7 días de edad. Posteriormente, fueron trasladadas a las dependencias de LEMCO en la Universidad Técnica Federico Santa María, donde se mantuvieron sumergidas en un estanque de agua saturada con cal a una temperatura de 23°C, garantizando un proceso de curado óptimo.

En cuanto a la geometría de las muestras, se utilizó lo estipulado por la norma EN 14651, empleando vigas prismáticas con una sección transversal de 150 mm de altura y una longitud total dentro del rango de 550 mm ≤ L ≤ 700 mm. Tres días antes de los ensayos de pre-agrietamiento, se realizó el entalle requerido en el centro de la luz. Este se ejecutó mediante corte con sierra de disco, con una profundidad de 25±1 mm y un espesor de 3 ± 0,5 mm, como se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Viga prismática modelo según EN-14651.

Por lo tanto, el cronograma recomendado para ejecutar correctamente el proceso de pre-agrietamiento es:

- Día 0: Confección de muestras
- Día 1: Desencofrado de muestras e inmersión en estanque.
- Día 25: Ejecución de entalle.
- Día 28: Pre-agrietamiento.
- Día 35: Inicio de ensayo Creep.

Siguiendo el cronograma de ensayo propuesto por el TC 261-CCF de RILEM, a la edad de 28 días se caracterizaron los hormigones reforzados con macrofibras ensayándolos de acuerdo con el procedimiento establecido en la norma EN 14651, los que se realizaron en una prensa con control por lazo cerrado, de 100 kN de capacidad, bajo control de apertura de los bordes de la fisura (CMOD) a razón de 0,05 mm/min hasta un CMOD = 0,1 mm y luego se aumentó a una velocidad igual a 0,2 mm/min.

La Figura 6 y Tabla 3 muestran los resultados de resistencia residual obtenidos a partir de la caracterización de las muestras a una edad de 28 días.

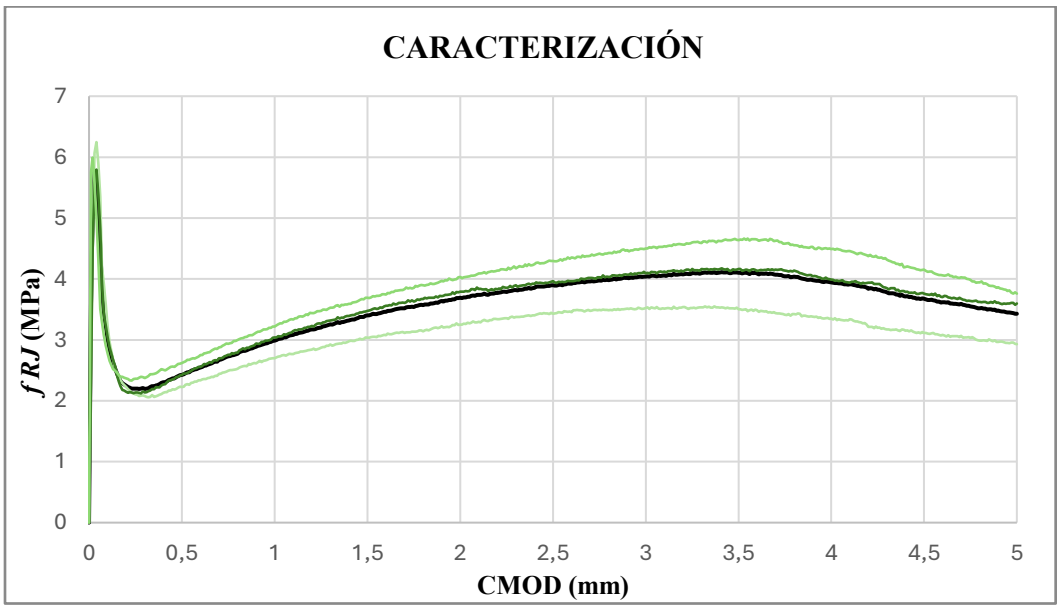


Figura 6. Resistencia residual, resultados de CMOD a 28 días.

Los resultados obtenidos en la caracterización a 28 días exponen un comportamiento típico y alineado con lo expuesto por diversos autores. En las curvas de la Figura 6 se observa un pico elástico inicial cercano a los 5,6 MPa, asociado al límite de proporcionalidad de la matriz. Tras la primera fisura, el material experimenta una caída en la capacidad de carga para, posteriormente, registrar un incremento en su resistencia residual. Este repunte evidencia el control de apertura de CMOD mediante la activación y anclaje de las macrofibras sintéticas.

Además, los datos presentados en la Tabla 3 respaldan este comportamiento, evidenciando una baja variabilidad en la respuesta mecánica de las muestras. Esta baja dispersión queda demostrada por los coeficientes de variación, los cuales registran un valor de 3,8% durante el límite de proporcionalidad y se mantienen en rangos controlados para las resistencias residuales f_{R1}, f_{R2}, f_{R3} y f_{R4}, alcanzando un máximo de 13,9%.

Tabla 3. Resistencias residuales a 28 días.

Muestra	$f_{LOP,i}$ (MPa)	f_{R1} (MPa)	f_{R2} (MPa)	f_{R3} (MPa)	f_{R4} (MPa)
1	5,99	2,62	3,69	4,30	4,64
2	6,25	2,22	3,03	3,43	3,50
3	5,80	2,43	3,48	3,96	4,16
f RJ, m	**6,01**	**2,42**	**3,40**	**3,90**	**4,10**
S	**0,23**	**0,2**	**0,34**	**0,44**	**0,57**
CV	**3,8%**	**8,1%**	**9,9%**	**11,2%**	**13,9%**

Considerando:

- $f_{LOP,i}$: resistencia residual a la tracción por flexión en el límite de proporcionalidad (LOP).
- $f_{R1,i}$: resistencia residual a la tracción por flexión correspondiente a CMOD = 0,5 mm.
- $f_{R2,i}$: resistencia residual a la tracción por flexión correspondiente a CMOD = 1,5 mm.
- $f_{R3,i}$: resistencia residual a la tracción por flexión correspondiente a CMOD = 2,5 mm.
- $f_{R4,i}$: resistencia residual a la tracción por flexión correspondiente a CMOD = 3,5 mm.
- $f_{RJ,m}$: promedio de resistencia residual a la flexo-tracción en un periodo definido.
- S**:** desviación estándar de los datos.
- **CV:** coeficiente de variación.

Estos resultados confirman la homogeneidad de la mezcla, el correcto llenado de las muestras y la efectividad del refuerzo sintético durante el ensayo de caracterización, asegurando la contención de apertura de CMOD en la zona de fisura en un comportamiento esperado.

Adicionalmente, se llevaron a cabo los ensayos de resistencia a la compresión, obteniéndose los resultados que se detallan en la Tabla 4.

Tabla 4. Resistencia a la compresión tras 28 días.

Cilindro	f'_c (MPa)
1	64,8
2	66,1
3	49,2
$f'_{c,m}$	**60,0**

Los resultados de resistencia a la compresión respaldan la calidad del hormigón elaborado, registrando un promedio de 60 MPa. Aun cuando el cilindro 3 registró una disminución en su resistencia (49,2 MPa) el coeficiente de variabilidad se mantiene dentro de un rango aceptable, no siendo significativo como para inferir fallas en la dosificación del hormigón.

5. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El procedimiento se realizó siguiendo la recomendación *RILEM TC 261-CCF* que se describe a continuación:

5.1 PRE-AGRIETAMIENTO

Al alcanzar los 28 días de curado, se realizó el pre-agrietamiento de la mezcla MSFRC-28 de acuerdo con los lineamientos de la norma EN 14651. El ensayo se llevó a cabo mediante un sistema hidráulico controlado por la apertura de boca de fisura (CMOD). Inicialmente se aplicó una carga constante de 0,05 mm/min hasta alcanzar un CMOD = 0,1 mm. Posteriormente, la velocidad se incrementó a 0,2 mm/min hasta registrar un valor de $CMOD_p$ = 0,5 mm, parámetro que permite determinar la resistencia residual ($f_{R,1}$).

Una vez alcanzada la deformación $CMOD_p$, las muestras se descargaron inmediatamente a una velocidad controlada de 0,2 mm/min, Tras la descarga, las muestras permanecieron en una etapa de reposo durante 7 días previos al inicio del ensayo de creep.

Por otra parte, las muestras MSFRC-365, se mantuvieron en la etapa de curado hasta marzo de 2025, fecha en la que se procedió a ejecutar su respectivo pre-agrietamiento.

Las Figuras 7 (a) y (b) muestran, respectivamente, el comportamiento y ejecución de las muestras durante el proceso de pre-agrietamiento.

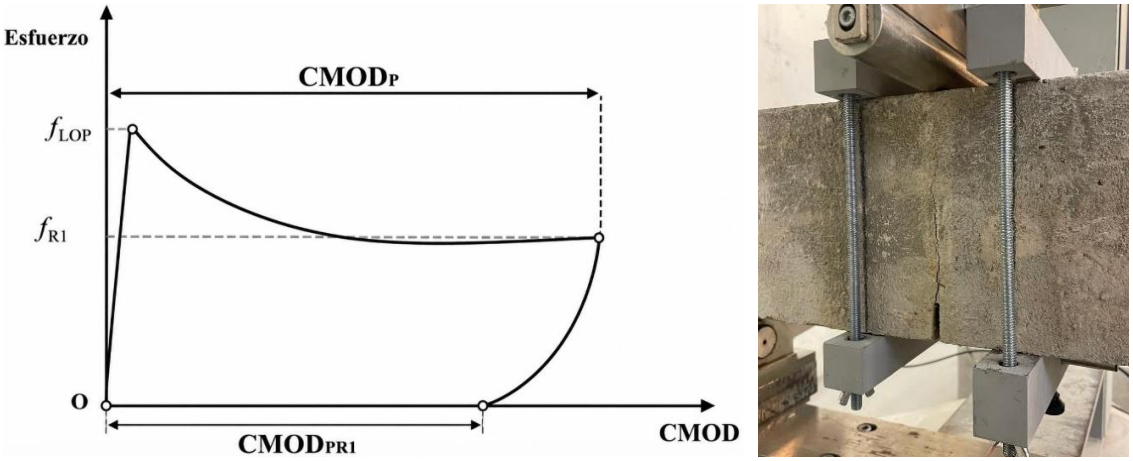


Figura 7. (a) Parámetros de pre-agrietamiento en muestras de HRF. (b) Pre-agrietamiento según EN 14651.

Tras recopilar y procesar los datos del pre-agrietamiento, se realizó la comparación gráfica del comportamiento de las muestras. En las Figuras 8 y 9 se presenta el comportamiento individual de las mezclas MSFRC-28 y MSFRC-365, respectivamente, cuyos valores de esfuerzo y CMOD residual se detallan en las Tablas 5 y 6. Por otra parte, en la Figura 10 se exponen de forma comparativa las curvas promedio obtenidas de ambos grupos de muestras.

A continuación, la Figura 8 y la Tabla 5 presentan los resultados obtenidos tras la ejecución del pre-agrietamiento en las muestras MSFRC-28:

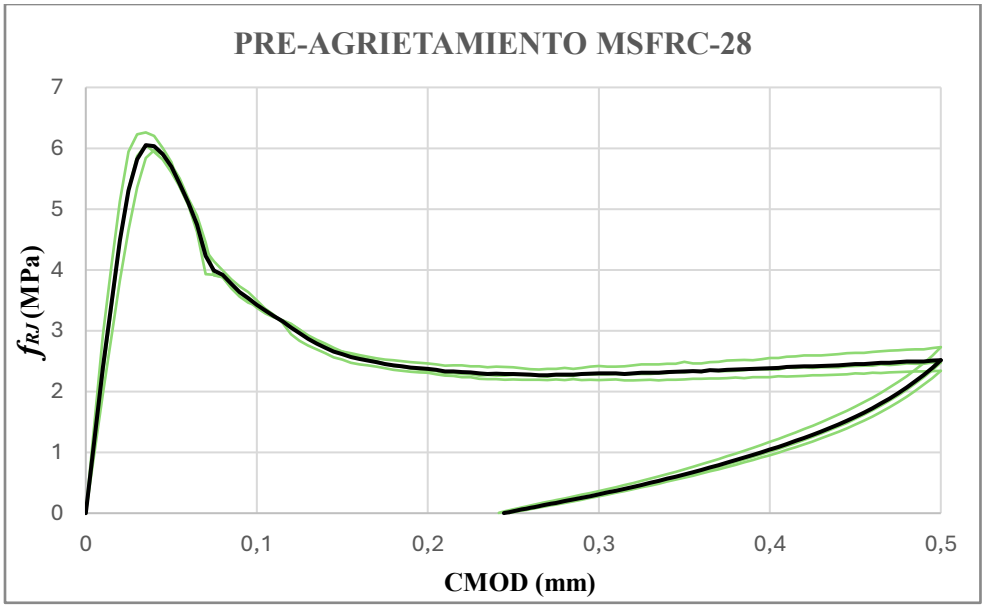


Figura 8. Pre-agrietamiento a 28 días MSFRC-28.

Respecto del pre-agrietamiento de las muestras MSFRC-28, se observa un comportamiento altamente consistente y alineado con lo esperado. El material alcanza un pico en su límite de proporcionalidad para, posteriormente, entrar en una etapa de repunte mediante la acción de las fibras, culminando al alcanzar un valor de CMOD = 0,5 mm antes de transicionar hacia una etapa de descarga controlada.

Tabla 5. Esfuerzo de pre-agrietamiento CMOD = 0,5 mm a 28 días MSFRC-28.

MUESTRA	$f_{R1,i}$ (MPa)
MSFRC-28_1	2,74
MSFRC-28_2	2,35
MSFRC-28_3	2,49
$f_{RJ,m}$	**2,52**
S	**0,197**
$CMOD_{PRI,m}$	**0,245**
CV	**7,81%**

Tras analizar los datos obtenidos luego de ejecutar el pre-agrietamiento en las muestras MSFRC-28, la Tabla 5 detalla la respuesta del elemento posterior al límite de proporcionalidad, en donde se registró un esfuerzo residual promedio de 2,52 MPa para un CMOD = 0,5 mm. Además, se observa que el valor de $CMOD_{PRI}$ es de 0,245 mm. Esta consistencia queda respaldada por una baja dispersión, evidenciada por una desviación estándar de 0,197 y un coeficiente de variación de 7,81%.

La Figura 9 presenta los resultados obtenidos tras la ejecución del pre-agrietamiento en las muestras MSFRC-365:

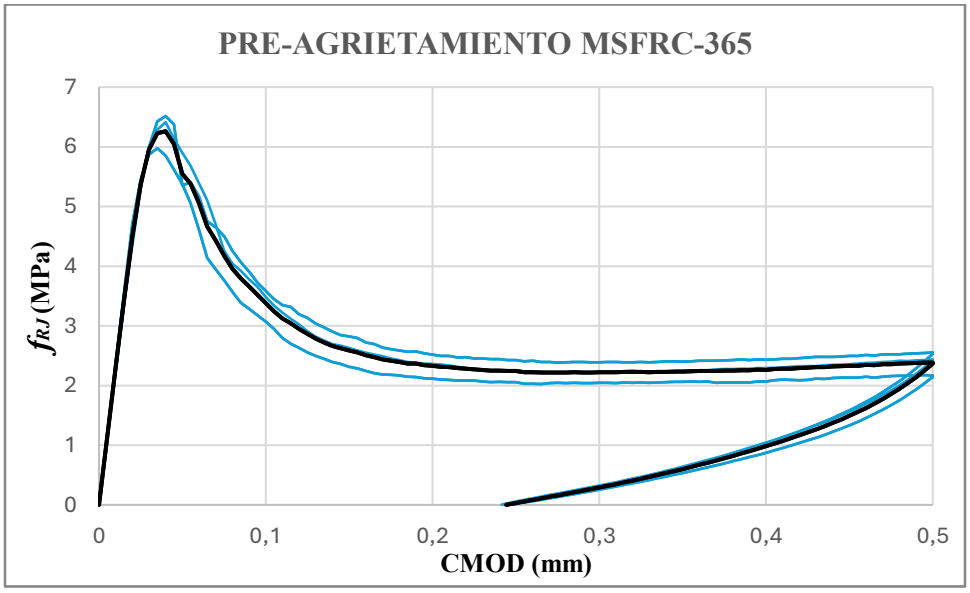


Figura 9. Pre-agrietamiento a 28 días MSFRC-365.

Considerando el pre-agrietamiento de las muestras elaboradas con la mezcla MSFRC-25, se presenta un comportamiento equivalente al observado en las muestras MSFRC-28. El material presenta una respuesta elástica inicial hasta registrar su límite de proporcionalidad para, posteriormente, experimentar una etapa de repunte condicionado por la activación de las fibras hasta alcanzar un CMOD = 0,5 antes del proceso de descarga.

Tabla 6. Esfuerzo de pre-agrietamiento CMOD = 0,5 mm MSFRC-365.

MUESTRA	$f_{RI,i}$ (MPa)
MSFRC-365_1	2,43
MSFRC-365_2	2,17
MSFRC-365_3	2,55
$f_{RJ,m}$	**2,38**
S	**0,194**
$CMOD_{PRI,m}$	**0,244**
CV	**8,15%**

Luego de analizar los valores obtenidos tras el pre-agrietamiento en las muestras MSFRC-365, la Tabla 6 detalla una respuesta sumamente homogénea del elemento luego de alcanzar el límite de proporcionalidad, respaldada por una baja dispersión con una desviación estándar de 0,194 y un coeficiente de variación de 8,15%. Además, la mezcla registró un esfuerzo residual promedio de 2,38 MPa para un CMOD = 0,5 mm, mientras que el $CMOD_{PRI}$ alcanzó un valor de 0,244 mm. Valores que ratifican la similitud con su contraparte.

Con la intención de comparar el comportamiento tras el pre-agrietamiento, la Figura 10 presenta ambas curvas promedio, relacionando CMOD y esfuerzo aplicado.

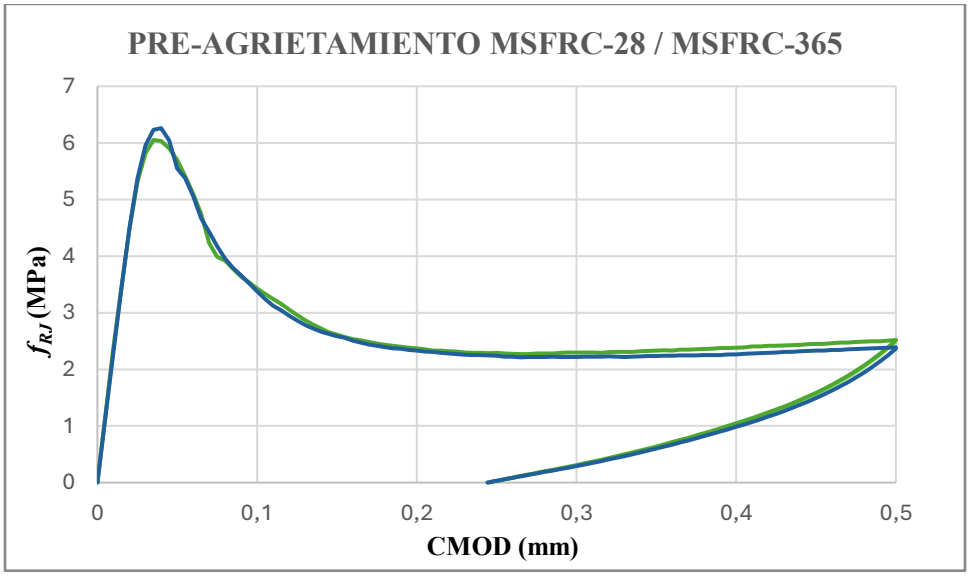


Figura 10. Pre-agrietamiento comparativo a 28 días MSFRC-28 y MSFRC-365.

Los resultados obtenidos tras el pre-agrietamiento para las muestras MSFRC-28 y MSFRC-365 evidencian una marcada similitud entre sí. Como se observa en las Figuras 8, 9 y 10 el comportamiento de las curvas esfuerzo-CMOD sigue una tendencia prácticamente idéntica, registrando valores de esfuerzo residual con diferencias mínimas y un coeficiente de variación general de apenas 7,82%.

Esto adquiere una relevancia mayor al considerar que la variación del comportamiento mecánico fue prácticamente nula. Confirmando que la diferencia en el periodo de curado no alteró el desempeño del elemento durante la etapa de pre-agrietamiento, evidenciando un patrón de repetibilidad durante la dosificación y elaboración de las probetas.

Al demostrar que ambas mezclas mantienen características mecánicas similares frente a la ejecución del pre-agrietamiento, se establece una proyección estructural del HRF disminuyendo la incertidumbre ante la aparición de fisuras y asegura que el comportamiento del elemento será predecible.

Una vez ejecutado el pre-agrietamiento, las muestras fueron trasladadas a la sala de ensayo creep. En este recinto, permanecieron en reposo durante un periodo de 7 días, con el propósito de permitir la recuperación elástica del material y estabilización de las deformaciones iniciales.

Durante esta fase de acondicionamiento, se mantuvieron condiciones ambientales controladas, con una temperatura de 20 ± 3 °C y una humedad relativa (HR) del 50%, con el objetivo de minimizar los efectos de la retracción por curado.

5.2 RAMA DE DESCARGA

Siguiendo el protocolo RILEM TC 261-CCF, la fase de pre-agrietamiento concluye al alcanzar una apertura de boca de fisura de CMOD = 0,5 mm. En ese instante, se inicia un proceso de descarga controlada a una tasa de 0,2 mm/min (según control de CMOD) hasta liberar completamente la muestra de esfuerzos externos.

A partir del ciclo de descarga, se determinan parámetros elásticos que caracterizan la interacción entre la matriz y el refuerzo sintético. Específicamente, se analizan las pendientes de las rectas tangentes en dos puntos clave de la curva de descarga.

La Figura 11 presenta esquemáticamente la curva de descarga obtenida una vez alcanzado $CMOD_p$, identificando 3 parámetros:

- *S_p: representa la rigidez tangencial de la sección fisurada al inicio de la descarga, evaluada en $CMOD_p$.*
- *$CMOD_{pri}$: correspondiente a la apertura residual de la fisura una vez que la viga ha sido completamente descargada.*
- *S_{pri}: representa la rigidez tangencial final de la viga, evaluada en $CMOD_{pri}$.*

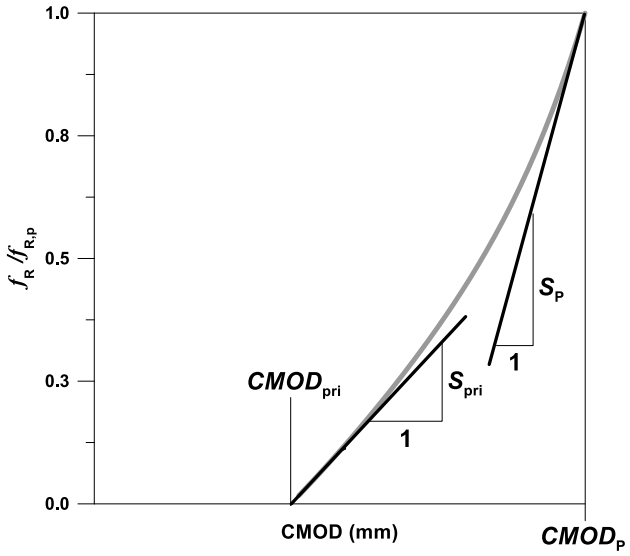


Figura 11. Curva de descarga, análisis de S_P y S_{pri}.

Además, para cada curva de descarga se realizó una regresión no lineal sobre la curva de descarga promedio, y su derivada se evaluó en $CMOD_P$ y $CMOD_{PRI}$, obteniéndose los valores promedios de pendiente indicados en la Tabla 7.

A continuación, las Figuras 12 y 13 muestran gráficamente las curvas de descarga promedio de MSFRC-28 y MSFRC-365.

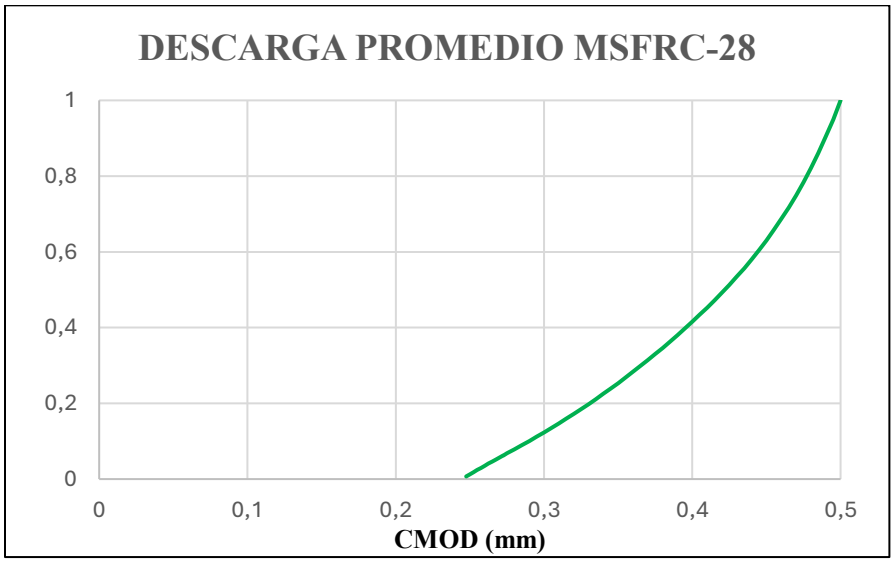


Figura 12. Curva de descarga promedio MSFRC-28.

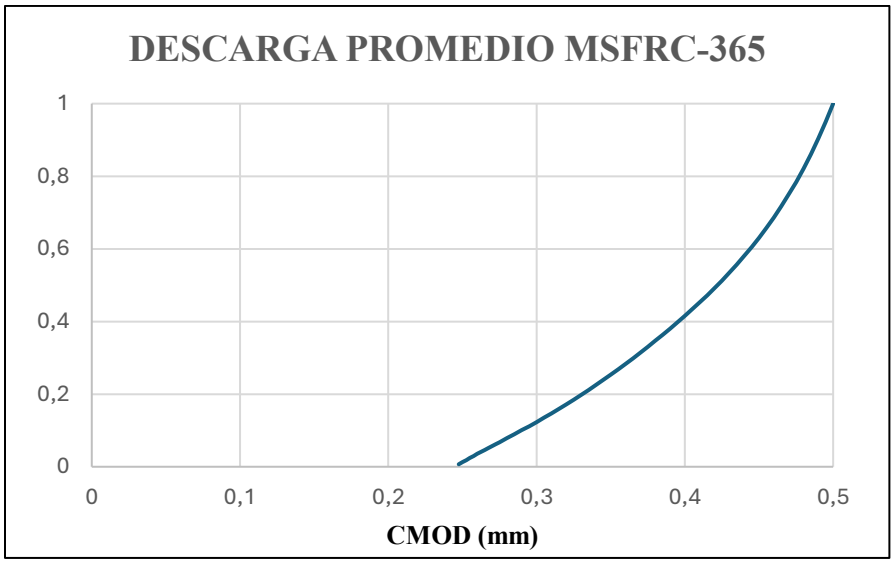


Figura 13. Curva de descarga promedio MSFRC-365.

El comportamiento gráfico de las muestras MSFRC-28 y MSFRC-365 tras la etapa de descarga evidencia una marcada similitud, ya que las curvas siguen una tendencia idéntica. Esto demuestra la homogeneidad de las fibras durante la elaboración de las muestras.

La Tabla 7 indica los resultados obtenidos a partir de las pendientes de las muestras MSFRC-28 y MSFRC-365.

Tabla 7. Valores S_p, $CMOD_{pri}$ y S_{pri} MSFRC-28 y MSFRC-365.

Parámetro	MSFRC-28	MSFRC-365
S_P (1/mm)	10,31	10,36
$CMOD_{PRI}$ (mm)	0,247	0,247
S_{PRI} (1/mm)	2,34	2,36

Tras analizar los resultados de las pendientes obtenidas en la Tabla 7, junto con el comportamiento expuesto en las Figuras 12 y 13, se puede aseverar que ambas muestras presentan un comportamiento sumamente similar durante la etapa de descarga. Tanto los valores de las pendientes (inicial y final) como también las curvas promedio demuestran un comportamiento casi idéntico, reflejando un patrón elástico tras el pre-agrietamiento inicial.

Estos datos permiten obtener un modelo de comportamiento esperado confiable para elementos bajo ciclos de carga. Además, el hecho de que los resultados de las pendientes no varíen tras el desfase en la ejecución del pre-agrietamiento confirma la repetibilidad de las muestras, demostrando que el desempeño del elemento se mantuvo constante a pesar del periodo de curado extra que experimentaron las muestras del año 2025.

5.3 CREEP

Para la ejecución de los ensayos de creep, se utilizaron marcos de carga normalizados, diseñados específicamente para garantizar la verticalidad de las probetas. Esta configuración es esencial para evitar deformaciones que pudieran alterar la precisión en la medición de la apertura de la fisura.

Siguiendo las recomendaciones del comité técnico RILEM TC 261-CCF, se implementó una configuración de ensayo de flexión *4PBT multi-especímen* tal como se muestra en la Figura 14. Este sistema permite ensayar hasta tres probetas de forma simultánea en una misma columna de carga, optimizando el rendimiento y asegurando que todas las muestras de una misma especie sean sometidas a una carga idéntica y constante.

El mecanismo de aplicación de carga opera mediante un sistema de brazo de palanca, el cual permite amplificar una fuerza ejercida por un contrapeso situado en el extremo. La carga se transmite a las probetas, generando un momento flector constante en el tercio central de las vigas, lo que deriva en solicitaciones de tracción en la sección de entalle.

La magnitud de la carga se calibró para generar una tensión equivalente al 50% de la resistencia residual obtenida durante la etapa de pre-agrietamiento. Este nivel de carga garantiza que el refuerzo de fibras trabaje bajo un régimen representativo de las condiciones de servicio de una estructura real.

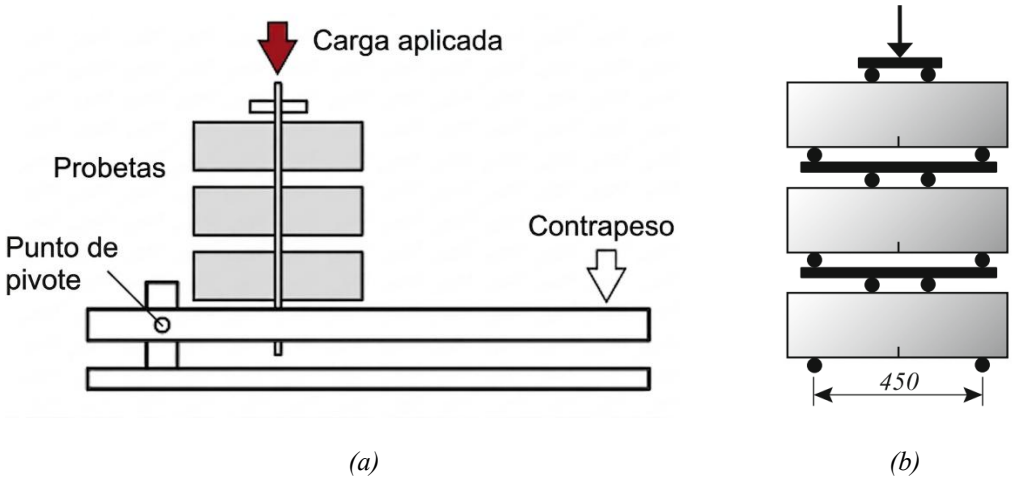


Figura 14. (a)Geometría del bastidor para ensayos de creep; (b) Configuración 4BPT propuesta por RILEM.

Las tres probetas prismáticas correspondientes a cada mezcla fueron posicionadas en el marco de carga utilizando la configuracion 4PBT. Para el monitoreo de la apertura de fisura, se instrumentó cada viga con un transductor LVDT con un rango de ±10 mm tal como se indica en la Figura 15.

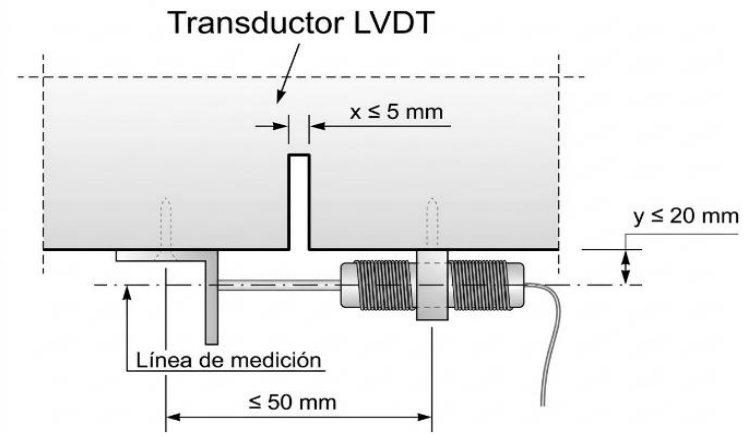


Figura 15. Posición del transductor recomendado por RILEM.

Los transductores se instalaron estratégicamente en la zona del entalle y se conectaron a un módulo convertidor analógico-digital de seis canales, encargado de la digitalización de las señales para su procesamiento.

Complementariamente, se integró una celda de carga con capacidad de 112 kN en la parte superior de cada bastidor. Este sensor vinculado al módulo de adquisición, permitió el monitoreo constante de la carga aplicada, garantizando que no existieran fluctuaciones durante el ensayo.

Como los transductores se instalan a una distancia determinada de la cara inferior de la probeta para evitar interferencias mecánicas, se hace necesario ajustar la lectura del sensor para obtener la apertura real en la boca de la fisura, mediante la siguiente fórmula:

$$Factor\ corrección\ CMOD = \frac{150\ [mm]}{170\ [mm]}$$

$$Factor\ corrección\ CMOD = 0.882$$

Dado que se implementó la configuración de flexión en cuatro puntos (4PBT), se deberá realizar una adaptación en la fórmula de resistencia. Para ello, se utiliza la ecuación (Ec.1), la cual asegura que el cálculo de la carga a aplicar en el ensayo sea representativo de la distribución de momentos flectores en la zona de la fisura:

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{F_{3PBT} \cdot L_{3PBT}}{b \cdot h^2} = \frac{F_{4PBT} \cdot L_{4PBT}}{b \cdot h^2} \qquad \text{(Ec.1)}$$

Donde:

- F_3: carga aplicada en etapa de pre-agrietamiento
- F_4: carga a utilizar en ensayo creep.
- L_3: Longitud del vano en configuración 3PBT.
- L_4: Longitud del vano en configuración 4PBT.
- b: corresponde al ancho de la viga (150 mm).
- h: corresponde a la altura de la viga (125 mm).

Al desarrollar la Ec. (1), obtenemos que la carga de creep será:

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{F_{3PBT} \cdot 500}{150 \cdot 125^2} = \frac{F_{4PBT} \cdot 450}{150 \cdot 125^2}$$

$$F_{4PBT} = 1.67 * F_{3PBT}$$

Para el caso de este estudio, se aplicará un factor de creep del 50%, por lo que el momento flector aplicado será:

$$F_{4PBT} = 0{,}83 * F_{3PBT}$$

Correspondiendo:

- $F_{3PBT} = P_{EN}$
- $F_{4PBT} = P_{CR}$

Considerando lo explicado en el punto anterior, la Tabla 8 expresa la magnitud de las cargas aplicadas durante el periodo de creep.

Tabla 8. Carga aplicada en cada marco de ensayo.

Muestras	$f_{R1,m}$ **(MPa)**	**Esfuerzo creep** $f_{R1,m}$ **** 50% (Mpa)***	**Carga de Creep** $P_{CR} = 1{,}67 * P_{EN}$ ***(N)***
MSFRC-28	2,50	1250	6564
MSFRC-365	2,39	1195	6210

La Figura 16 permite identificar de forma gráfica las dimensiones y variaciones entre el modelo 3PBT y 4PBT.

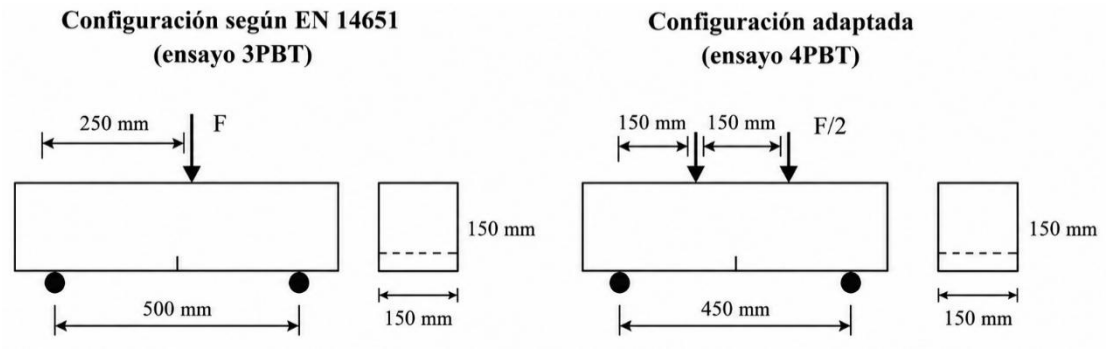


Figura 16. Distribución de cargas para 3PBT y 4PBT.

Tras determinar las cargas a aplicar en las muestras, se procede a situarlas en los marcos de carga de acuerdo con lo descrito en la recomendación RILEM TC 261, tal como se ilustra en la Figura 17.

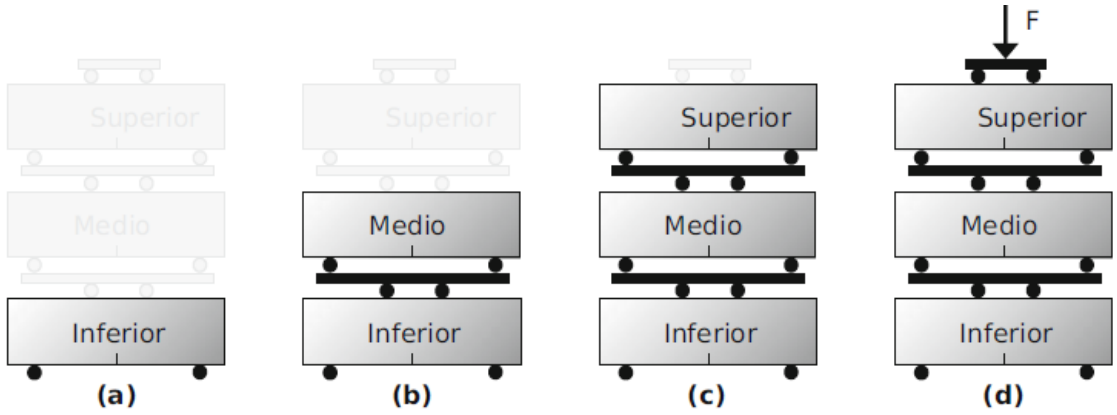


Figura 17. Montaje de muestras mediante la configuración 4PBT.

La Figura 18 muestra el montaje experimental utilizado durante el ensayo de creep. En esta configuración, las tres muestras se disponen a distancias equidistantes entre sí, manteniendo fijos los puntos de apoyo para garantizar una correcta transferencia de esfuerzos. Asimismo, se sitúa la celda de carga en la sección superior y se disponen los contrapesos encargados de aplicar el momento flector constante sobre el sistema.

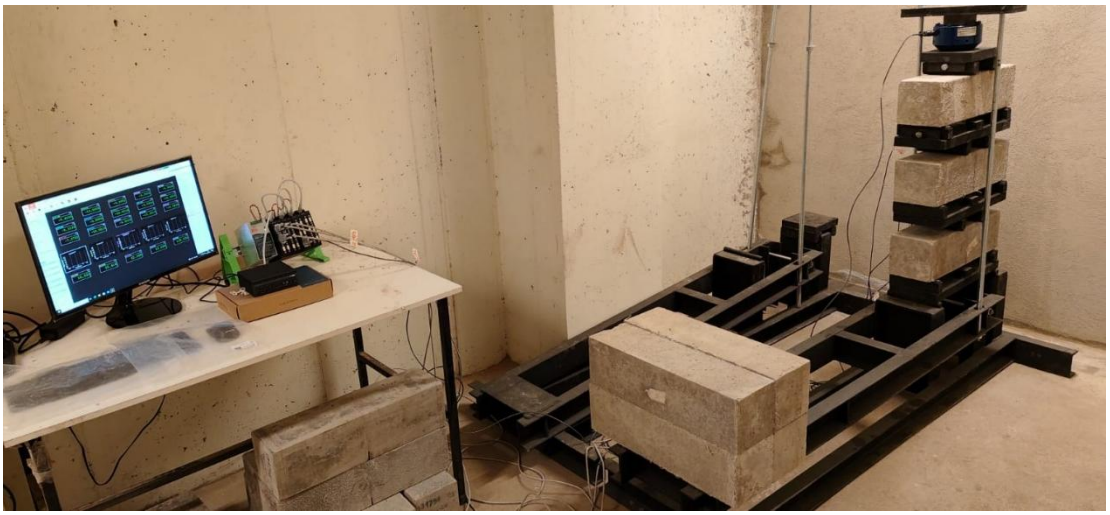


Figura 18. Sala de adquisición de datos.

Durante los 210 días que comprendió la etapa de creep, se empleó un sistema automatizado de adquisición de datos para monitorear continuamente tanto la carga ejercida como la apertura de boca de fisura (CMOD).

Estos parámetros fueron registrados con una frecuencia de muestreo de una hora, permitiendo una caracterización detallada de la evolución de la fisura y la posterior elaboración de las curvas de comportamiento para ambas mezclas.

En la Figura 19 se presentan las curvas de apertura de fisura correspondiente a la mezcla MSFRC-28 tras completar 210 días de ensayo. En la Tabla 9 se exponen los resultados obtenidos al finalizar el periodo.

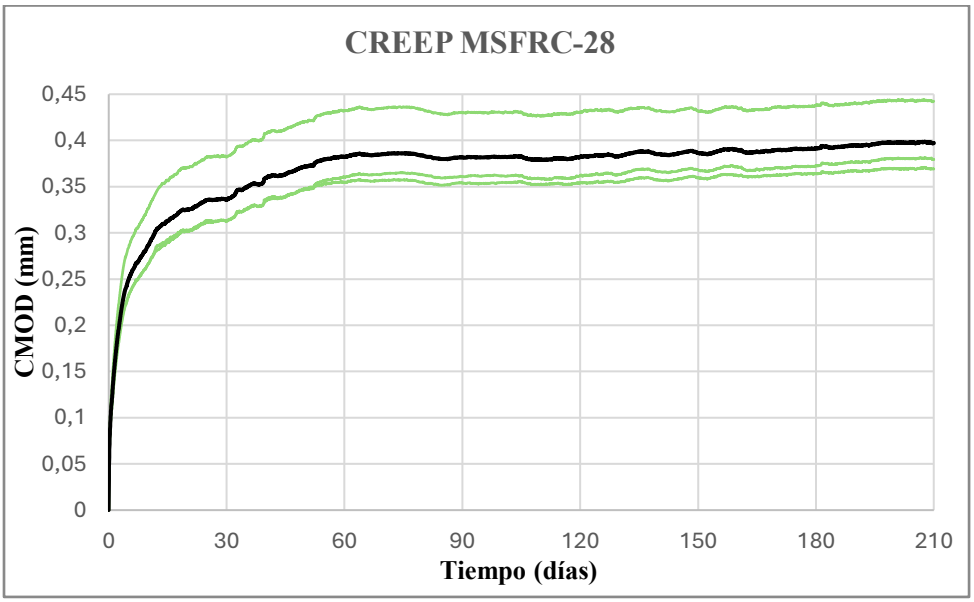


Figura 19. Curva Creep (2024), registrada hasta los 210 días de ensayo.

Respecto al comportamiento de las muestras MSFRC-365 durante la etapa de creep, se observa un patrón consistente entre las probetas ensayadas, evidenciando una adecuada repetibilidad de los resultados. En particular, las muestras presentan un prolongado período de control de la apertura de fisura tras la aplicación de la carga sostenida, manteniendo una alta tasa de deformación durante aproximadamente los primeros 50 días de ensayo. Posteriormente, la evolución del CMOD tiende a un comportamiento asintótico, caracterizado por una disminución progresiva de la velocidad de apertura de la fisura. Esta tendencia se mantiene hasta los 210 días de ensayo, alcanzándose un valor final de CMOD igual a 0,397 mm y un coeficiente de variabilidad de 9,95%.

Tabla 9. Apertura promedio de fisura a 210 días.

Mezcla	$CMOD_{cd}^{210}$(mm)
MSFRC-28_1	0,369
MSFRC-28_2	0,442
MSFRC-28_3	0,379
$CMOD_{cd,\ m}^{210}$	**0,397**
CV	**9,95%**

En la Figura 20 se presentan las curvas de evolución de la apertura de fisura para la mezcla MSFRC-365 tras el periodo de 210 días de ensayo. En la Tabla 10 se exponen los resultados obtenidos al finalizar el periodo.

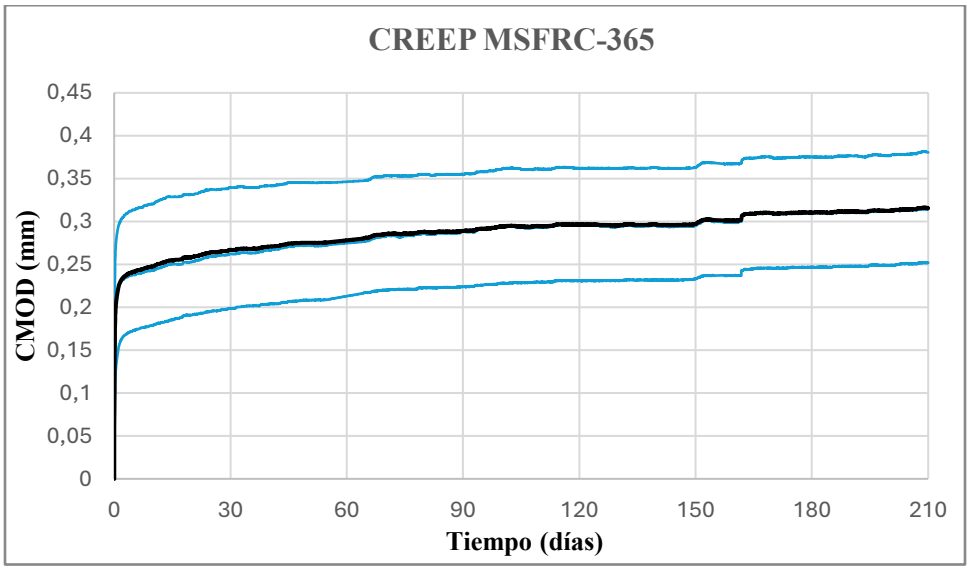


Figura 20. Curva Creep (MSFRC-365), registrada hasta 210 días de ensayo.

En el caso de las muestras MSFRC-365, si bien se observa una mayor dispersión de los datos (con un coeficiente de variación de 20,39%) en comparación con las muestras MSFRC-28, los resultados evidencian un comportamiento consistente bajo carga sostenida. Tras la aplicación de la carga, las probetas experimentaron un período de control de apertura de fisura, el cual se extendió aproximadamente durante los primeros 5 días de ensayo.

Posteriormente, la evolución del CMOD presentó una tendencia asintótica característica de una etapa de apertura controlada de fisura, con una disminución progresiva de la tasa de deformación a lo largo del tiempo. Este comportamiento se mantuvo hasta los 210 días de ensayo, registrándose un valor final de CMOD de 0,315 mm.

Tabla 10. Apertura promedio de fisura a 210 días.

Mezcla	$CMOD_{cd}^{210}$(mm)
MSFRC-365_1	0,380
MSFRC-365_2	0,251
MSFRC-365_3	0,314
$CMOD_{cd,\ m}^{210}$	**0,315**
CV	**20,39%**

La Figura 21 expone el comportamiento promedio de las mezclas MSFRC-24 y MSFRC-25 bajo los efectos de creep tras 210 días de ensayo.

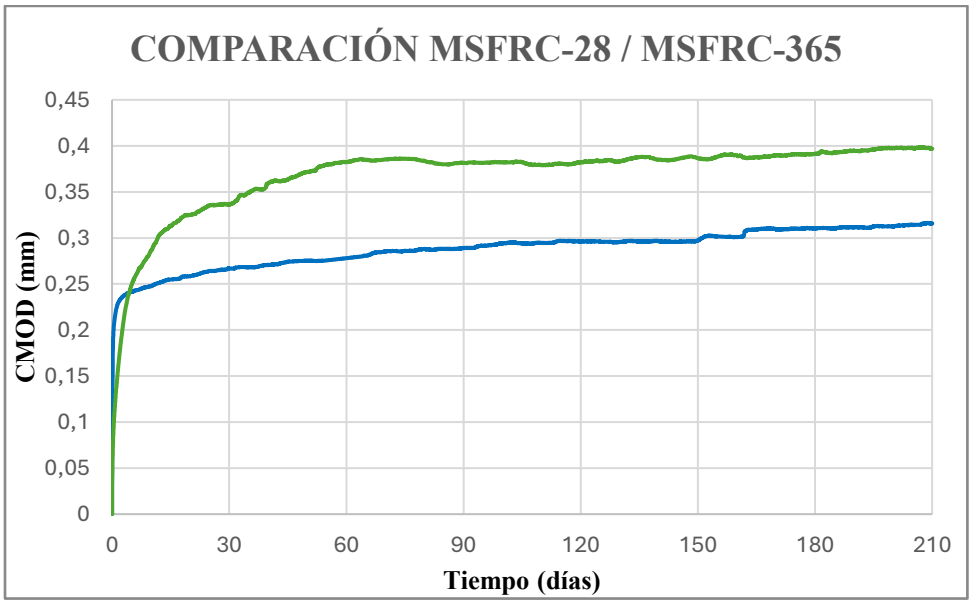


Figura 21. Comparación de curvas Creep MSFRC-28 y MSFRC-365.

Al analizar cada conjunto de muestras se puede observar que MSFRC-28 tuvo un menor coeficiente de variación, menor promedio de CMOD y un CMOD final 26,3% mayor que su contraparte, alcanzando los 0,397 mm frente a los 0,315 mm de MSFRC-25. Además, se expone el incremento inicial de MSFRC-28 hasta la estabilización de curva aproximado en CMOD = 0,37 mm durante un periodo de 50 días, en comparación con las muestras MSFRC-365 que tuvieron una apertura inicial menor, alcanzando la fase de estabilización en CMOD = 0,27 mm tras un periodo de 5 días.

Posteriormente, ambas curvas experimentaron un comportamiento asintótico de apertura controlada, disminuyendo la tasa de deformación en una etapa de pendiente constante. Durante este periodo, que se extiende hasta los 210 días de ensayo, las dos mezclas mantuvieron trayectorias paralelas y estables. lo que demuestra que, a pesar de que la mezcla MSFRC-28 mantiene un CMOD mayor, ambas logran mitigar el riesgo de un fallo por una propagación inestable de la fisura a largo plazo.

6. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Tras analizar el comportamiento de las mezclas MSFRC-28 y MSFRC-365 tras el procedimiento recomendado por RILEM TC 261, se realizan las siguientes acotaciones:

El comportamiento de ambas mezclas durante las etapas de pre-agrietamiento y descarga resulta casi idéntico, este fenómeno resulta de particular interés si se considera que la mezcla MSFRC-365 cuenta con un año adicional de curado en comparación con MSFRC-28. A pesar de esta diferencia en el curado de la matriz, los parámetros experimentales mostraron una equivalencia notable en $CMOD_{PRI}$ y en las pendientes de descarga. Esta consistencia se ve respaldada por un coeficiente de variación general de apenas 7,82%, lo que demuestra que el tiempo extra de curado no alteró la rigidez elástica de la matriz fibra-hormigón.

Por otra parte, se observa una diferencia significativa en la magnitud de la deformación desarrollada hasta alcanzar la estabilización de la apertura de boca de fisura. La mezcla MSFRC-28 alcanzó la estabilización aproximadamente al día 50, registrando un CMOD = 0,374 mm, mientras que MSFRC-365 arrojó un valor significativamente menor, situándose en CMOD = 0,27 mm tras un periodo de 5 días.

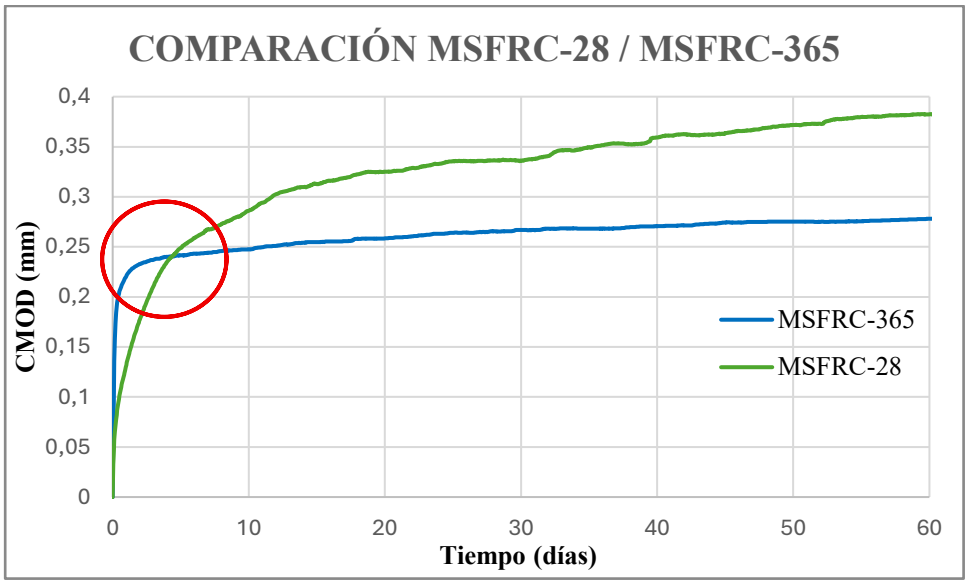


Figura 22. Diferencia en la estabilización de curvas, periodo comprendido hasta los 60 días.

La Figura 22, muestra la evolución promedio de CMOD durante los primeros 60 días posteriores a la aplicación de la carga de creep. Se observa que ambas mezclas experimentan una apertura inicial, sin embargo, sus comportamientos varían a medida que transcurre el tiempo. Mientras que MSFRC-365 alcanza la estabilización durante el quinto día de ensayo, la mezcla MSFRC-28 continúa deformándose hasta aproximadamente el día 50.

La Tabla 14, muestra el CMOD promedio alcanzado por las mezclas MSFRC-28 y MSFRC-365 en los periodos de 5, 15 y 30 días tras la aplicación de la carga. Estos registros permiten monitorear la respuesta inmediata del HRF durante la primera etapa de creep, donde se produce la mayor tasa de deformación antes de entrar en la etapa estable.

Tabla 11. Apertura promedio de fisura a 5, 15 y 30 días de carga MSFRC-28 y MSFRC-365.

Mezcla	CMOD (mm) 5 días	CMOD (mm) 15 días	CMOD (mm) 30 días
MSFRC-28	0,248	0,312	0,336
MSFRC-365	0,241	0,254	0,267

Esta disparidad indica que las muestras MSFRC-24 experimentaron una deformación 33,3% mayor que MSFRC-365, sugiriendo que MSFRC-365 posee mayor control en la fisuración inmediata debido a una mejor adherencia y respuesta elástica de la fibra.

Tras 2500 horas de ensayo (aproximadamente 3,5 meses) los resultados se alinean con lo que indica la literatura técnica, ya que el fenómeno de creep es crítico durante los primeros 90 días, luego presentan un cambio en la pendiente de las curvas, adquiriendo un comportamiento asintótico. Este comportamiento es fundamental para garantizar la seguridad

estructural, demostrando que a pesar de que el material continúa deformándose, la velocidad de apertura disminuye drásticamente con el tiempo, impidiendo una falla frágil.

Para corroborar el análisis anterior, se realizó la comparación de pendientes CMOD-tiempo, con el objetivo de obtener la tasa de deformación diaria. los valores de apertura de fisura registrados para ambas mezclas en el intervalo comprendido entre 90 - 210 días, con el objetivo de obtener resultados fieles a la realidad del ensayo ya que es el punto en que se estabilizan ambas pendientes.

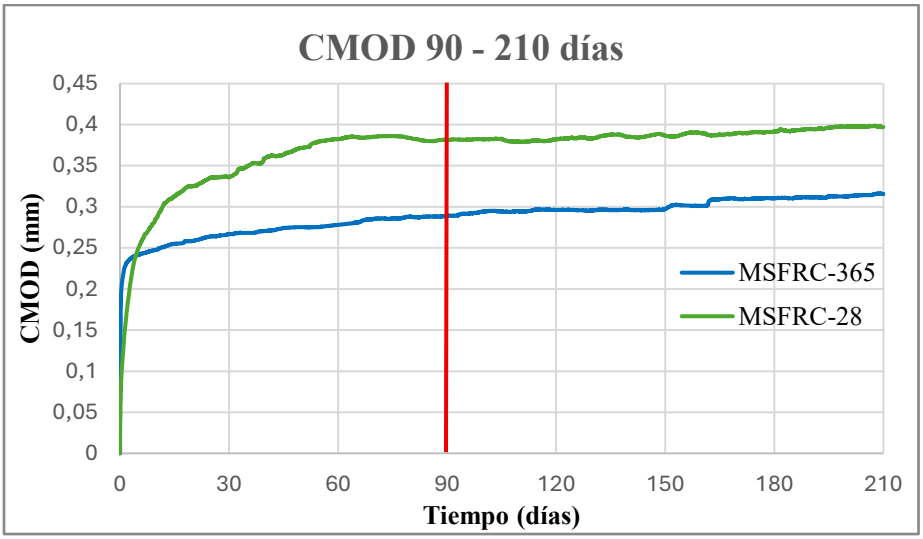


Figura 23. Detalle de reacomodo de cargas durante el periodo comprendido entre 90 - 210 días.

La Tabla 12, presenta los valores de CMOD registrados durante el periodo comprendido entre 90 - 210 días del ensayo creep.

Tabla 12. Apertura promedio de fisura 90 – 210 días, MSFRC-28 y MSFRC-365.

Tiempo (días)	CMOD (mm) MSFRC-28	CMOD (mm) MSFRC-365
90	0,381	0,296
210	0,397	0,313

A partir la información anterior, la Tabla 13 expone la tasa de deformación diaria calculada para cada mezcla en los periodos comprendidos entre 90 - 210 días de ensayo.

Tabla 13. Tasa de deformación diaria en el intervalo de 90 - 210 días para MSFRC-28 y MSFRC-365.

Tasa de deformación (µm/día) entre 90 – 210 días	
MSFRC-28	0,133
MSFRC-365	0,141

Con base en el análisis de las pendientes de ambas curvas, se evidencia que las muestras correspondientes a la mezcla MSFRC-28 ofrecen un mayor control de la apertura de fisura en el intervalo evaluado, evidenciado por una tasa de deformación diaria de 0,133 µm/día, inferior a los 0,141 µm/día registrados para la mezcla MSFRC-365. Esta diferencia indica una menor evolución de la apertura de fisura para la mezcla MSFRC-28, reflejando un comportamiento más estable en el periodo evaluado.

Por otra parte, si bien ambas mezclas presentan una tendencia de deformación progresiva durante el tiempo analizado, la mezcla MSFRC-365 mantiene una evolución estable de apertura de fisura desde el inicio del periodo de aplicación de la carga, lo cual permite establecer una tendencia en su comportamiento frente a cargas sostenidas. Esta característica es vital para su aplicación en elementos de sostenimiento, ya que, al presentar una respuesta predecible frente a las condiciones de carga evaluadas, garantiza la integridad del elemento durante el periodo analizado.

7. CONCLUSIONES

El presente estudio permitió validar experimentalmente la consistencia en el desempeño mecánico del hormigón reforzado con macrofibras sintéticas mediante la metodología recomendada por RILEM TC 261 y la norma EN 14651. Para ello, se evaluaron las mezclas MSFRC-28 y MSFRC-365, ambas dosificadas con 7 (kg/m^3) de fibras sintéticas BarChip48.

Los resultados obtenidos tras la etapa de pre-agrietamiento evidenciaron una alta homogeneidad en las curvas de esfuerzo-CMOD de ambas mezclas, las cuales presentaron trayectorias prácticamente coincidentes. Al analizar los esfuerzos residuales, se obtuvieron valores de $f_{R,1}$ = 2,52 MPa (MSFRC-28) y $f_{R,1}$ = 2,38 MPa (MSFRC-365). Considerando un coeficiente de variación general de 7,82%, se confirma un patrón de repetibilidad metodológica entre ambas series.

Al comparar las pendientes de las curvas de descarga, la mezcla MSFRC-365 presentó un ligero incremento de 0,48% en la pendiente de descarga inicial (S_p = 10,36 mm^{-1}) y de 0,85% en la pendiente de descarga residual (Spri = 2,36 mm^{-1}), respecto de la mezcla MSFRC-28 (S_p = 10,31 mm^{-1} y S_{pri} = 2,34 mm^{-1}). Estos resultados demuestran que el periodo adicional de curado al que fueron sometidas las muestras de la mezcla MSFRC-365 no modificó significativamente la capacidad de recuperación elástica del material, consolidando un comportamiento elástico y predecible.

La evaluación del efecto de creep durante un periodo de 210 días confirmó la efectividad de las macrofibras sintéticas para mitigar la propagación de la apertura de boca de fisura, permitiendo que ambas mezclas desarrollaran una fase de apertura controlada. El análisis comparativo mostró que la mezcla MSFRC-28 registró una apertura promedio final de 0,397 mm, valor que representa un incremento de 26% respecto de la mezcla MSFRC-365 (0,315 mm). Asimismo, la curva promedio de MSFRC-365 alcanzó su estabilización alrededor del quinto día (CMOD = 0,27 mm), mientras que MSFRC-28 se mantuvo en proceso de apertura hasta aproximadamente el día 50, estabilizándose en un CMOD = 0,37 mm.

Este comportamiento sugiere que un mayor tiempo de curado favorece el desarrollo de un mejor anclaje mecánico de las fibras, restringiendo el deslizamiento dentro de la matriz cementicia. En el caso estudiado, la mezcla MSFRC-28 presentó un desempeño levemente más favorable durante la etapa comprendida entre la aplicación de la carga y la estabilización de la apertura de boca de fisura, periodo crítico ya que condiciona la magnitud de apertura alcanzada durante el ensayo de creep. Una vez alcanzada la estabilización en ambos conjuntos de muestras, se observó que las tasas de deformación durante los intervalos de 90 a 210 días fueron similares, registrándose valores de 0,133 μm/día para MSFRC-28, y de 0,141μm/día para MSFRC-365, respectivamente.

Esto indica que las diferencias entre ambas mezclas se concentraron principalmente en la etapa posterior a la aplicación de la carga, donde el menor tiempo de curado de MSFRC-28 habría disminuido la capacidad de anclaje fibra-matriz, permitiendo un mayor deslizamiento de las fibras y, en consecuencia, una mayor apertura de fisura. En contraste, el mayor tiempo de curado de MSFRC-365 habría favorecido el desarrollo de una interfaz fibra-matriz más resistente, reduciendo la apertura inicial y condicionando un comportamiento más estable durante todo el período de evaluación.

En la práctica, durante la proyección de la mezcla se produce un reordenamiento de las fibras en orientaciones que favorecen su capacidad de puenteo frente a la aparición de fisuras. Este fenómeno permite que las macro fibras actúen dentro del rango elastoplástico y trabaje el anclaje mecánico proporcionado por el estriado presente en las caras laterales, el cual limita el deslizamiento en la interfaz fibra-matriz, permitiendo una apertura controlada de CMOD demostrando un desempeño estable y predecible durante todo el período de ensayo, alcanzando niveles de control de fisura compatibles con los requisitos de servicio para aplicaciones en sostenimiento y revestimiento de túneles. En este contexto, un mayor tiempo de curado favorece la consolidación de la interfaz fibra-matriz, incrementando la eficacia de dichos mecanismos y mejorando la respuesta mecánica bajo cargas sostenidas.

El análisis del comportamiento de las mezclas MSFRC-28 y MSFRC-365 contribuye a reducir la incertidumbre asociada a los efectos de envejecimiento y la fatiga del material bajo condiciones de servicio. En consecuencia, es posible establecer criterios técnicos confiables para la utilización de este hormigón reforzado con fibras, ya que, frente a solicitaciones sostenidas en el tiempo, el material exhibe una respuesta predecible, conservando tanto su capacidad resistente como la tenacidad aportada por las macro fibras sintéticas.

8. BIBLIOGRAFÍA

Bashar, I. I., Sturm, A. B., Visintin, P., & Sheikh, A. H. (2023). *Pullout creep of hooked-end steel fibers embedded in ultra-high performance concrete*. *Construction and Building Materials, 366*, 130189.

Carmona, S., Plizzari, G., & Barraza, J. (2025). *Long-term behavior of FRC with hybrid fibers for tunnel linings*. Universidad Técnica Federico Santa María.

Del Prete, C., Buratti, N., & Mazzotti, C. (2022). *Experimental analysis of time-dependent phenomena and temperature effects in macro-synthetic fibre-reinforced concretes under different loading conditions*. *Construction and Building Materials, 326*, 126904.

European Committee for Standardization. (2005). *Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual) (EN 14651:2005+A1:2007)*.

Llano-Torre, A., & Serna, P. (2021). *Recommendation of RILEM TC 261-CCF: Test method to determine the flexural creep of fibre reinforced concrete in the cracked state*. *Materials and Structures, 54*, 124.

Plizzari, G., & Serna, P. (2018). *Structural effects of FRC creep*. *Materials and Structures, 51*, 167.

Pujadas, P., Blanco, A., Cavalaro, S., de la Fuente, A., & Aguado, A. (2017). *The need to consider flexural post-cracking creep behavior of macro-synthetic fiber reinforced concrete*. *Construction and Building Materials, 149*, 790–800.

Shen, D., Liu, C., Kang, J., Yang, Q., Li, M., Li, C. C., & Zeng, X. (2022). *Early-age autogenous shrinkage and tensile creep of hooked-end steel fiber reinforced concrete with different thermal treatment temperatures*. *Cement and Concrete Composites, 131*, 104550.

Vrijdaghs, R., Di Prisco, M., & Vandewalle, L. (2020). *Uniaxial tensile creep behavior of macro-synthetic fiber reinforced concrete*. *Materials and Structures, 53*, 64.

Zerbino, R., & Barragán, B. E. (2012). *Long-term behavior of cracked steel fiber reinforced concrete beams under sustained loading*. *ACI Materials Journal, 109*(2), 215–224.