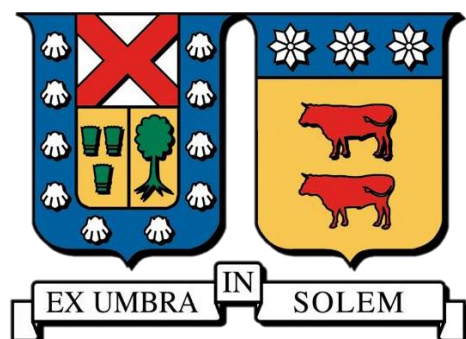


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES
VALPARAÍSO - CHILE



**EFFECTO DE LAS CARGAS SOSTENIDAS EN EL INCREMENTO DE
APERTURA DE FISURA DE HORMIGONES REFORZADOS CON
FIBRAS DE ACERO**

Memoria de titulación presentada por
NAHUEL JESÚS CALDERÓN HERRERA

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 las cargas sostenidas en el incremento de apertura de fisura de hormigones reforzados con fibras de acero.

Nombre del candidato(a): Nahuel Jesús Calderon Herrera

Carrera / Grado: Construcción Civil

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

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Sergio Carmona Malatesta, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

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

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

☒ 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: 29-09-2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 29-09-2026

Firma:

AGRADECIMIENTO

Alcanzar esta meta, representa la culminación de una etapa llena de desafíos. La distancia con mi familia, momentos perdidos, el proceso de adaptación y la madurez para comprender el impacto de cada decisión marcaron las etapas más exigentes del camino, pero gracias al respaldo incondicional de quienes me rodean y apoyan, logré mantenerme firme y seguir adelante.

Extiendo un sincero agradecimiento a mi profesor guía, Sergio Carmona Malatesta, por sus conocimientos y su disposición para guiarme durante la realización de esta investigación. También a la casa de estudios que me acogió, y a todos los docentes que me entregaron sus conocimientos y apoyaron en esta etapa.

Y principalmente, agradecer a mi familia, el pilar fundamental en mi vida. A mi madre Paola y mi padre Carlos, por su gran esfuerzo y apoyo incondicional para poder superar esta etapa, brindarme confianza, darme todo su amor, gracias a ellos por formarme como una persona de buenos valores, y enseñarme que cada sacrificio tiene su recompensa. A mi hermano Amaro, con quien compartí un hogar nuevo, lejos de nuestra familia, donde tuvimos muchos momentos felices. A mi novia Noelia, quien siempre estuvo para apoyarme, siendo un pilar fundamental en momentos difíciles. A mis tíos y abuelos, quienes siempre me dieron consejos desde su experiencia, me apoyaron sin dudarlos y siempre estuvieron ahí. Y a mis amigos, quienes eran desconocidos en un principio y terminaron siendo parte de mi familia, con quienes viví alegres momentos y estuvieron siempre para darme una mano.

Muchas gracias.

DEDICATORIA

*“A mis padres Carlos y Paola,
por ser el apoyo incondicional en todo este proceso,
por todo su sacrificio para que pueda llegar a esta instancia,
les agradezco de corazón.”*

RESUMEN

Esta investigación estudia cómo el efecto de las cargas sostenidas en el incremento de la apertura de fisuras (CMOD) en hormigón reforzado con fibras (HRF), siguiendo la metodología experimental recomendada por el Comité Técnico 261 de RILEM. Para ello, se elaboraron y ensayaron vigas prismáticas con una dosificación de 30 kg/m^3 de fibras metálicas (Dramix 3D 65/35). Para el ensayo se sometieron especímenes a una etapa inicial de pre-agrietamiento hasta alcanzar una apertura de fisura de 0,5 mm, y posteriormente se procedió a ensayarlos en Creep, donde se aplicaron cargas equivalentes al 50% y 100% de la resistencia residual por un período de 80 días.

Los resultados muestran que una mayor edad del hormigón (mayor hidratación) mejora el anclaje de fibras y acelera la estabilización de las fisuras bajo cargas de servicio (50%). Sin embargo, al someter los especímenes a cargas extremas (100% de resistencia residual), estos entran en un régimen de deformación no lineal, aumentando drásticamente la apertura de las fisuras a lo largo del tiempo

En conclusión, el paso del tiempo y la hidratación tardía en el hormigón, mejoran significativamente su rigidez, el anclaje de fibras y la capacidad de recuperación, reduciendo así el tiempo de estabilización del creep. Sin embargo, los ensayos revelan que el comportamiento es sensible al nivel de carga; al someter el material al 100% de su resistencia, se destruye la adherencia de las fibras progresivamente, aumentando las deformaciones.

Debido a esto, el diseño de estructuras de alta exigencia, como los túneles de AVO requiere la aplicación de márgenes de seguridad elevados, asegurando así que el comportamiento del material se mantenga en régimen lineal y libre de riesgos.

ABSTRACT

This research studies the effect of sustained loads on crack width increment (CMOD) in fiber-reinforced concrete (FRC), following the experimental methodology recommended by RILEM Technical Committee 261. Prismatic beams were fabricated and tested with a dosage of 30 kg/m³ of metallic fibers (Dramix 3D 65/35). Specimens were subjected to an initial pre-cracking stage until a crack width of 0.5 mm was reached, and subsequently subjected to creep testing, where loads equivalent to 50% and 100% of the residual strength were applied for a period of 80 days.

The results show that a greater age of the concrete (greater hydration) improves fiber anchorage and accelerates crack stabilization under service loads (50%). However, when the specimens are subjected to extreme loads (100% of residual strength), they enter a nonlinear deformation regime, drastically increasing crack opening over time.

In conclusion, the passage of time and delayed hydration in concrete significantly improve its stiffness, fiber anchorage, and recovery capacity, thus reducing the creep stabilization time. However, tests reveal that the behavior is sensitive to the load level; when the material is subjected to 100% of its strength, the fiber bond is progressively destroyed, increasing deformations.

Therefore, the design of high-stress structures, such as AVO tunnels, requires the application of high safety margins, thus ensuring that the material's behavior remains in a linear and risk-free regime.

GLOSARIO

HRF: Hormigón reforzado con fibras

Creep: (del inglés) Deformación lenta y progresiva bajo carga sostenida a lo largo del tiempo. Deformación diferida del hormigón cuando está sometido a esfuerzos de flexión prolongados. Especialmente relevante en vigas y elementos sometidos a momentos flectores.

Recuperación elástica diferida: Es el proceso mediante el cual un material sometido a una carga prolongada recupera parte de su deformación elástica de manera gradual después de que la carga ha sido retirada.

Resistencia Residual a la tracción por flexión: Tensión ficticia en el fondo de la entalla que se supone actúa, en el caso de una distribución lineal de tensiones, en una sección no agrietada en el centro del vano de un prisma sometido a una carga puntual centrada.

DAS: sistema de adquisición de datos

CMOD: desplazamiento de la abertura de la boca de la grieta

CMOD_{pn}: objetivo de CMOD nominal en la etapa previa al agrietamiento

CMOD_p: CMOD máximo alcanzado en la etapa previa al agrietamiento

CMOD_{pri}: CMOD residual medido inmediatamente después de la descarga al final de la etapa de pre-agrietamiento

$f_{R,j}$: resistencia a la tracción de la flexión residual para diferentes niveles de apertura de grietas $j = 1, 2, 3$ o 4 de acuerdo con EN 14651

f_L : resistencia a la tracción de la flexión residual en el límite de proporcionalidad (LOP)

$f_{R,1}$: resistencia a la tracción de la flexión residual correspondiente a $CMOD = 0,5$ mm

$f_{R,3}$: resistencia a la tracción de la flexión residual correspondiente a $CMOD_3 = 2,5$ mm

$f_{R,p}$: resistencia a la tracción de la flexión residual en $CMOD_p$

$f_{R,c}$: tensión aplicada durante la etapa de creep

F_c : carga aplicada a la muestra durante la etapa de creep

ÍNDICE

AGRADECIMIENTO	1
DEDICATORIA	2
RESUMEN	3
ABSTRACT	4
GLOSARIO	5
1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. OBJETIVO	7
2.1. Objetivo general	7
2.2. Objetivo específico	7
3. MARCO TEÓRICO – COMPORTAMIENTO DE LOS HRF FISURADOS FRENTE A CARGAS SOSTENIDAS EN EL TIEMPO	8
3.1. Procedimiento experimental detallado.	10
3.1.1. Especímenes de prueba.....	11
3.1.2. Equipamiento.....	12
4. DETALLES EXPERIMENTALES	15
4.1. Hormigones ensayados	15
4.2. Caracterización	17
4.3. Ensayo Creep	18
4.3.1. Etapa Pre-cracking (O-C)	18
4.3.2. Etapa Creep (D-G).....	24
5. Análisis de resultados	31
6. Conclusiones.....	32
7. Bibliografía.....	34

1. INTRODUCCIÓN

El tramo Príncipe de Gales – Rotonda Grecia del Proyecto Amerigo Vesputio Oriente (AVO) consiste en la construcción de una autopista subterránea de 5,2 km de longitud, donde 4,7 km corresponde a túneles construidos bajo el Nuevo Método Austriaco (NATM), con un revestimiento temporal de una capa de hormigón proyectado, con una resistencia a la compresión de 25 MPa y de 250 mm de espesor, reforzado con un contenido mínimo de 25 kg/m³ fibras de acero, que debe cumplir con la clasificación 2b de resistencia post agrietamiento, según el Código Modelo *fib* 2010, y marcos de acero y un revestimiento final de una capa de hormigón proyectado o moldeado.

A pesar de que el comportamiento de los hormigones reforzados con fibras de acero ha sido ampliamente estudiado y caracterizado en las últimas décadas (García-Taengua et al. 2014; Zhao, Di Prisco y Vandewalle, 2015; Plizzari y Serna, 2021), su comportamiento frente a cargas sostenidas y su efecto en el comportamiento estructural ha sido mucho menos estudiado.

En esta memoria se propone cuantificar el efecto de cargas sostenidas en el incremento de la apertura de fisura en hormigones reforzados con fibras de acero, de acuerdo con la recomendación de RILEM TC 261 (2021), sometidos a diferentes niveles de carga.

2. OBJETIVO

2.1. Objetivo general

Evaluar el efecto de las cargas sostenidas en el incremento de la apertura de fisura de vigas de hormigón reforzado con fibras de acero, utilizando la metodología recomendada por el Comité Técnico 261 de RILEM.

2.2. Objetivo específico

- Medir el efecto de la carga sostenida en la apertura de la fisura de vigas pre agrietadas de hormigones reforzados con fibras de acero sometidas a diferentes niveles de carga.
- Evaluar el efecto del nivel de carga de creep en la apertura de fisura de hormigones reforzados con fibras de acero.

3. MARCO TEÓRICO – COMPORTAMIENTO DE LOS HRF FISURADOS FRENTE A CARGAS SOSTENIDAS EN EL TIEMPO

El hormigón reforzado con fibras (HRF) es un material compuesto que integra una matriz cementicia tradicional con fibras (fibras de acero para esta investigación) distribuidas aleatoriamente, diseñadas para transformar el comportamiento frágil del hormigón convencional en uno dúctil. Su función principal ocurre cuando el hormigón se fisura, donde las fibras actúan mediante un mecanismo de puenteo que ancla las grietas, permitiendo la transferencia de esfuerzos y otorgando al material una capacidad de carga residual. Gracias a esto es que se logran evitar fallas violentas y repentinas, y además permite que el elemento estructural siga soportando tensiones y controle la apertura de grietas bajo condiciones de cargas prolongadas en el tiempo. Sin embargo, el éxito de este mecanismo a nivel estructural no es automático. Tal como concluyen Abrishambaf, Barros y Cunha (2015), el comportamiento a tracción post-fisuración del material está "considerablemente influenciado tanto por la dispersión como por la orientación de las fibras".

El comportamiento a largo plazo del HRF ha sido un tema crítico y de importancia en los últimos años, ya que con el tiempo se ve afectada la durabilidad y seguridad de estructuras. Si bien el creep, entendido como el incremento progresivo de la deformación bajo una carga constante en el tiempo, ha sido ampliamente estudiado y modelado en el hormigón tradicional mediante teorías viscoelásticas, la incorporación de fibras en este introduce nuevas variables que modifican esta respuesta, especialmente cuando el elemento trabaja en estado fisurado. Debido a esto es que el desafío actual está en comprender la evolución temporal de estas deformaciones cuando existen cargas sostenidas por períodos prolongados, algo vital para tener un mejor diseño de estructuras de HRF.

Parte fundamental de este diseño radica en comprender la asimetría del fenómeno. La investigación experimental ha demostrado que la magnitud de la fluencia de tracción es más importante y pronunciada que la de compresión. Afortunadamente, la adición de fibras metálicas tiene un efecto directo en su mitigación; según estudios citados por Zheng *et al.*, (2018), "el índice inicial de fluencia básica por tracción del hormigón simple es mayor que el del hormigón reforzado con fibras (FRC)".

A diferencia del hormigón tradicional, donde el paso a un estado fisurado implica una pérdida drástica de rigidez, el HRF presenta una respuesta mecánica lineal y dúctil gracias al efecto de puenteo de fisuras (crack bridging). Con esto las fibras actúan como un elemento estructural activo que redistribuye las tensiones y limita la apertura de las fisuras. Al analizar la Zona de Proceso de Fractura y este puenteo de grietas, el uso específico del acero marca una diferencia en la contención del creep. Tal como detalla la investigación de Li *et al.* (2024), en ensayos comparativos se ha "indicado que las fibras de acero eran más eficaces para inhibir la propagación de grietas" en contraste con las fibras de polímeros sintéticos, soportando mejor las cargas a largo plazo.

Sin embargo, según Bashoff y Abrishambaf la fluencia de los HRF fisurados no es un fenómeno aislado, sino la suma de tres simultáneos: el creep de la matriz de hormigón en la zona comprimida, la deformación por tracción de las propias fibras (según el material) y el deslizamiento progresivo en la interfaz fibra-matriz debido a la pérdida de adherencia o anclaje con el tiempo.

Para caracterizar esto, se analiza el historial de carga-deflexión en ensayos donde se pueden observar tres etapas diferenciadas, tal como se observa en la Fig. 1 a continuación:

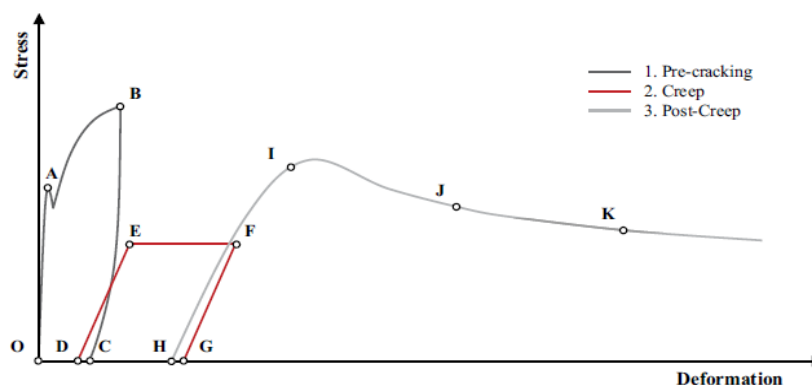


Figura 1 : diagrama de carga típico en ensayo creep (Torre-Llano y Serna, 2021).

La etapa de pre-agrietamiento somete a la probeta a ciclos de carga y descarga (tramos O, A, B, C) para inducir la fisura inicial controlada, lo que simula el estado del hormigón fisurado. En la segunda etapa, que se visualiza en la Fig. 1 como el ciclo rojo, se recarga la probeta hasta un nivel de esfuerzo sostenido (50% y 100%) y se mantiene constante en el tiempo. En el tramo E-F a pesar de tener el mismo nivel de esfuerzo, el material experimenta

un aumento progresivo de deformación debido al comportamiento viscoelástico y al deslizamiento de las fibras. Y en la última etapa, la de post-creep, la probeta tras ser descargada es ensayada hasta la rotura total para determinar su resistencia residual y ductilidad tras haber soportado cargas prolongadas en el tiempo.

Ahora bien, enfocándonos en la etapa del creep, diversos autores (Kurtz y Balaguru, 2000; Liu *et al.* 2009; Qin *et al.* 2024) han mencionado en sus investigaciones que esta se divide en tres partes, fluencia primaria, secundaria y terciaria como se aprecia en la Fig.2. La etapa de fluencia primaria se caracteriza por una alta deformación pero que decae inmediatamente después de la aplicación de la carga. La segunda etapa, la de creep, presenta una deformación más estabilizada y constante, acá se representa cómo será la vida útil de una estructura bajo cargas de servicios. Y la última etapa, muestra una aceleración de la apertura de la fisura que conduce al colapso del material por falla progresiva.

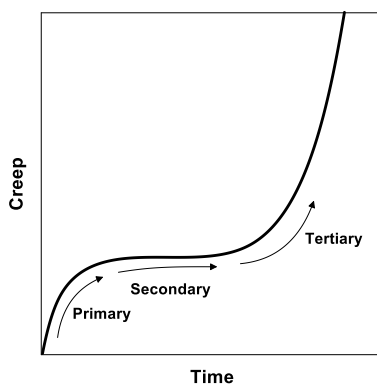


Figura 2: curva típica de fluencia (Kurtz y Balaguru, 2000).

Como inician y cuánto duran estas etapas depende drásticamente del nivel de carga, por lo que los especímenes cargados al 50% y al 100% reflejan estas diferencias. Cuando las probetas de HRF se ensayan al 50% de la carga máxima (el nivel de servicio), se encuentran dentro del régimen de fluencia lineal. Por otra parte, para el 100% de carga (umbral cercano a la carga máxima de falla), el material entra en un régimen de fluencia no lineal.

3.1. Procedimiento experimental detallado.

Todo el procedimiento experimental se lleva a cabo según la TC 261 de RILEM (Llano-Torre y Serna, 2021) que es el método de ensayo para determinar la deformación por

fluencia en flexión del hormigón reforzado con fibras en estado agrietado. A continuación, se detalla el procedimiento y los puntos a considerar:

3.1.1. Especímenes de prueba

Se utilizarán especímenes de prueba prismáticos conforme a la EN 14651 (CEN, 2007) con sección transversal nominal de 150 x 150 mm y longitud no inferior a 550 mm ni superior a 700 mm. Además, el tamaño máximo del agregado debe ser menor o igual a 32 mm y las fibras no medir más de 60 mm. Respecto a la cantidad de fibras no hay requisito mínimo ni máximo, pero para este caso se utilizarán 30 kg de fibras metálicas Dramix 3D 65/35 por cada metro cúbico.

Los especímenes deben verterse y curarse en conformidad con la EN 14651. Luego de un curado de 25 días deberán entallarse y deberán curarse durante un mínimo de 3 días. Finalmente, la prueba de prefisurado se realizará a los 28 días conforme a la norma.

En resumen, el comité técnico de RILEM TC 261 recomienda el siguiente programa:

- Día 0: Producción de muestras.
- Día 1: Las muestras se desmoldan y se colocan en la sala de curado.
- Día 25: Las muestras son entalladas y devueltas a la sala de curado.
- Día 28: Las muestras son prefisuradas y almacenadas en la sala de prueba de creep.
- Día 35: Inicio de ensayo creep.

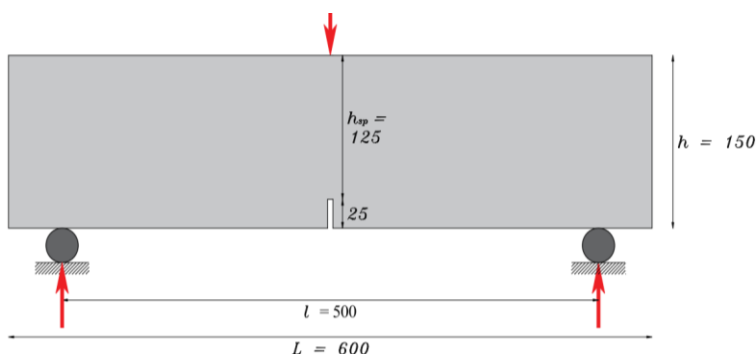


Figura 3: Esquema de carga y probeta según EN 14651.

3.1.2. Equipamiento.

3.1.2.1. *Condiciones ambientales*

Se debe tener suma importancia con la temperatura y humedad relativa en el comportamiento a largo plazo del HRF. La ubicación de los marcos de fluencia debe ser en salas de ensayo aisladas, con equipo térmico e higrométrico que controle la temperatura y humedad relativa. De no tener equipo de control, las condiciones climáticas deben considerarse como “restringidas”.

La temperatura recomendable durante el ensayo de creep es de $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. En cuanto a la humedad relativa, la humedad relativa recomendada en la sala durante el ensayo de fluencia debe tener un valor objetivo entre 50 y 70% y debe permanecer estable dentro de un rango de $\pm 5\%$.

3.1.2.2. *Marco de ensayo*

Los marcos de ensayo deben ser contruidos y posicionados de tal manera que garanticen la verticalidad y una carga constante durante el ensayo. Y las probetas deben ensayarse individualmente o en un montaje de varias probetas (hasta 3).

La carga debe aplicarse mediante un brazo de palanca de segundo grado tal como se muestra en la Fig.4 Existen 2 configuraciones de marcos válidas:

(a) brazo superior con transmisión en compresión, este se apoya directamente sobre la probeta, por lo que la carga depende solo del contrapeso y del factor del brazo, lo que asegura mayor estabilidad en el tiempo y un proceso de carga más simple y rápido, favoreciendo la precisión en el cálculo del coeficiente de fluencia.

(b) brazo inferior con transmisión en tracción, que requiere elementos adicionales de transferencia de carga, como barras roscadas y tuercas. Esto aumenta el tiempo de preparación y puede generar variaciones en la carga aplicada debido a factores como el par de apriete, afectando la tensión con el tiempo.

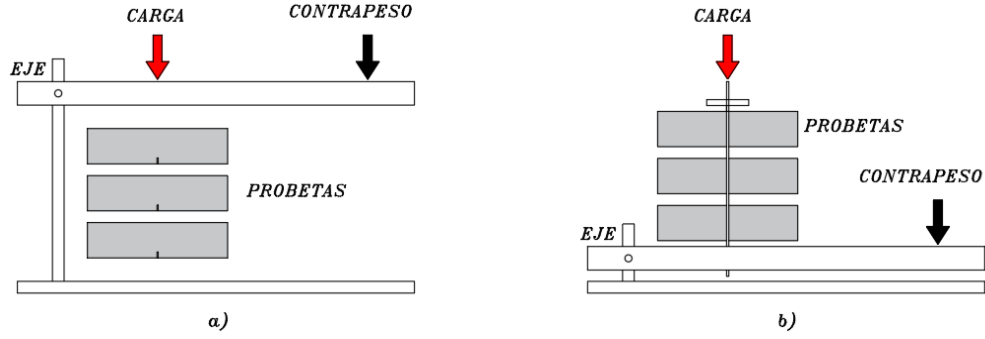


Figura 4: opciones de esquema de marco creep

Por otra parte, la configuración de las cargas puede ser 3PBT (ensayo de flexión en tres puntos) para una sola probeta o 4PBT (ensayo de flexión en cuatro puntos) cuando son varias probetas. Ambas configuraciones son definidas por las posiciones de los apoyos y las distancias entre puntos de carga como se muestra en la Fig.5.

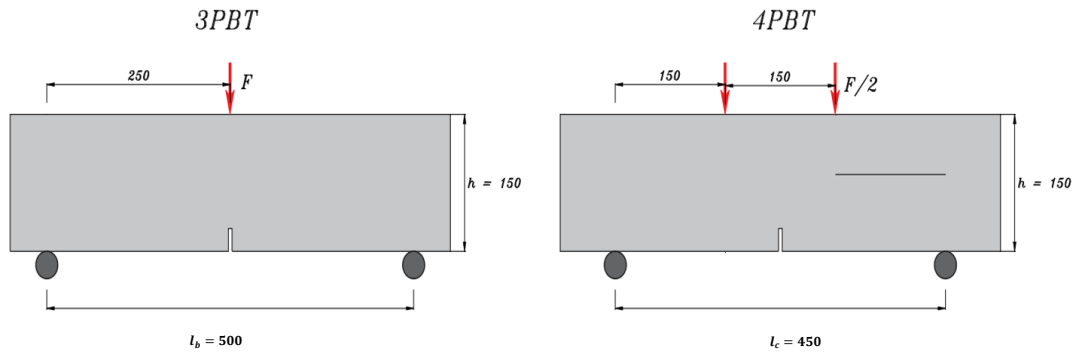


Figura 5: Configuraciones recomendadas de carga de flexión: a configuración de flexión EN 14651 3PBT y b configuración adaptada 4PBT.

Como el objetivo del ensayo es aplicar una tensión constante en el tiempo, se requiere calcular la carga F con la ecuación correspondiente a cada configuración:

- En 3PBT

$$M = \frac{F}{2} \cdot \frac{l_b}{2} = \frac{F l_b}{6} \text{ donde } F_{Rj} = \frac{6M_j}{b h_{sp}^2} = \frac{3F_j l_b}{2b h_{sp}^2} \quad \text{ec. (1)}$$

- En 4PBT

$$M = \frac{F}{2} \cdot \frac{l_c}{3} = \frac{F l_c}{6} \text{ donde } F_{Rj} = \frac{6M_j}{b h_{sp}^2} = \frac{F_j l_c}{b h_{sp}^2} \quad \text{ec. (2)}$$

Para el caso de esta investigación, se utilizará el marco con brazo inferior con transmisión en tracción y con la configuración de carga 4PBT, conformada por 3 probetas, como se muestra en la Fig. 6 y Fig. 7.

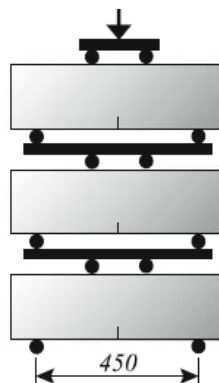


Figura 6: configuración recomendable 4PBT múltiple (A. Llano-Torre. P. Serna).



Figura 7: montaje de probetas para Creep con configuración 4PBT en LEMCO.

3.1.2.3. Transductores (sistema de adquisición de datos)

La apertura de la fisura (CMOD) debe medirse y registrarse durante todo el ensayo creep. Con este objetivo es que se recomiendan dos transductores, medidores tipo clip y transductores de desplazamiento de núcleo variable lineal (LVDT), que serán utilizados para esta investigación. Para los transductores tipo LVDT, la separación entre los dos puntos de medición no debe superar los 50 mm, como se indica en la Fig. 8. Estos deben instalarse en la parte inferior de la probeta, orientados paralelamente al eje longitudinal y centrados respecto a su ancho. La distancia entre la cara inferior de la probeta y la línea de medición debe ser inferior a 20 mm.

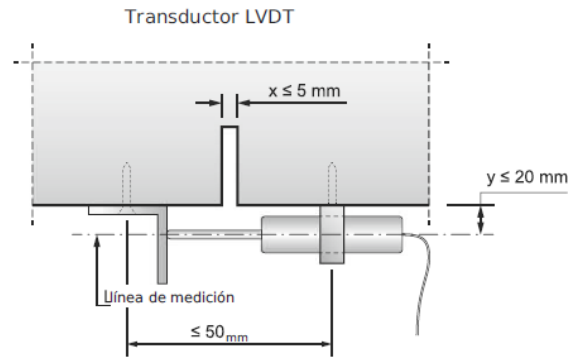


Figura 8: esquema del posicionamiento transductor LVDT (A. Llano-Torre. P. Serna).

4. DETALLES EXPERIMENTALES

4.1. Hormigones ensayados

Para el ensayo se estudió un HRF con 30 kg/m^3 de fibras metálicas Dramix 3D 65/35, mostradas en la Figura 9, el cual fue elaborado el día 14 de febrero del 2024 en las instalaciones de la compañía pre-mezcladora de hormigón UNICON, ubicada en Quilicura, usando las dosificaciones de la Tabla 1.

Tabla 1: dosificación de HP-1, en kg/m^3 .

MATERIAL	HP-1
Cemento	425
Agua	210
Gravilla 13 mm	120
Arena gruesa	1250
Arena fina	247
Aditivo Plastocrete 4	2,0
Aditivo Viscocrete	4,0
Aditivo Micro- Sílice	21
Fibras metálicas	30



Figura 9: fibras metálicas Dramix 3D 65/35.

Se prepararon 4 m³ de hormigón mezclado con 120 kg de fibras metálicas (30 kg/m³) y siguiendo la norma EN14651 se moldearon 20 vigas prismáticas (Fig.10) con una sección transversal de 150 x 150 mm y una longitud total de 600 mm. Además, se elaboraron 6 cilindros normalizados para ser ensayados a compresión. Respecto al moldeo y compactación, este fue en moldajes plásticos, y el hormigón se vertió de manera continua para evitar segregación del material y fibras, para luego ser compactado mediante una mesa vibratoria, el tiempo que indica la norma. A la vez se obtuvo la consistencia del hormigón mediante el cono de Abrams dando 230 mm a una temperatura de 17,7 °C.

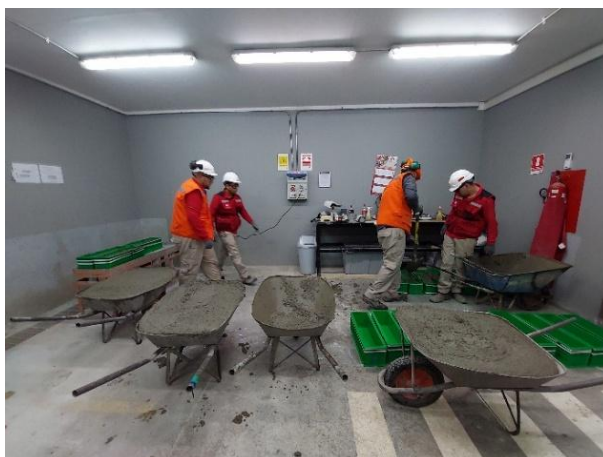


Figura 10: elaboración de probetas en laboratorio de Llay-Llay.

Luego de 24 h de su elaboración, en una cámara húmeda (temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y $\text{HR} \geq 95\%$) en el laboratorio de Llay-Llay para su curado. Respecto al entalle, este se realizó con una sierra diamantada refrigerada por agua en forma perpendicular a la dirección de vertido del hormigón, para mitigar los efectos de borde en la distribución de fibras. El entalle tiene un ancho ≤ 5 mm y una profundidad (h_{sp}) de 15 ± 1 mm.

A los 22 días fueron trasladadas al laboratorio LEMCO de la Universidad Técnica Federico Santa María para sus respectivos ensayos donde fueron ingresadas a la cámara húmeda para cumplir el tiempo de curado, como se muestra en la Fig.11.



Figura 11: Cámara húmeda de LEMCO UTFSM.

4.2. Caracterización

Transcurridos los 28 días de su elaboración, se ensayan las probetas para obtener la caracterización del hormigón, que se puede apreciar en la Fig. 12. Este análisis permite evaluar sus propiedades mecánicas, determinando su resistencia residual (Tabla 2) y resistencia a la compresión (Tabla 3). Respecto a los ensayos realizados en 2025, las probetas estuvieron 378 y 484 días en la cámara húmeda, para su ensayo creep al 50% y 100% respectivamente.

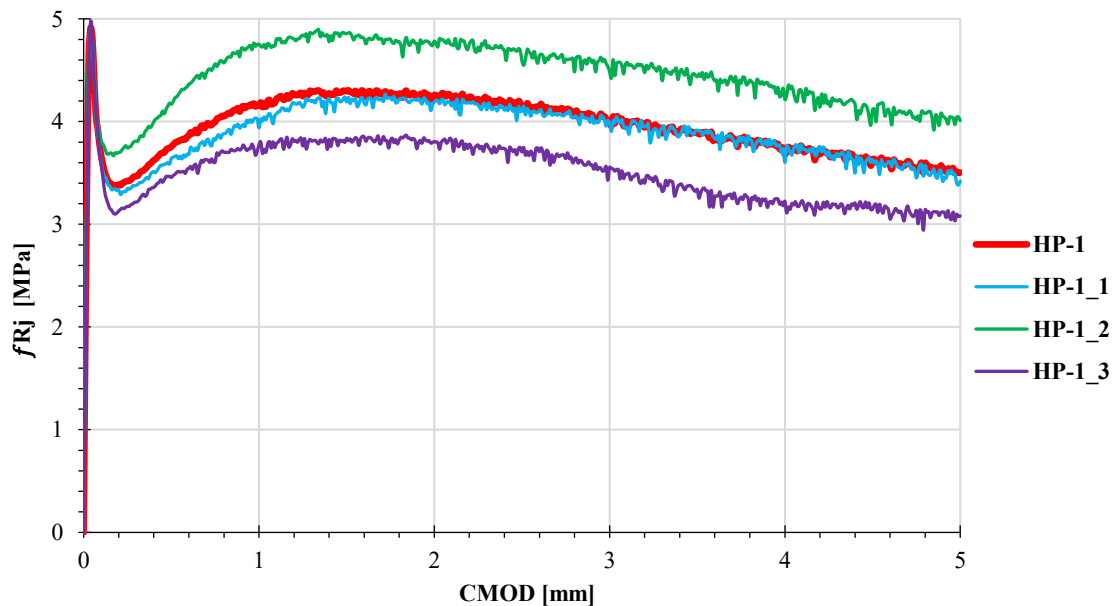


Figura 12: curva de caracterización.

En el gráfico se muestra la caracterización del hormigón, donde la línea celeste representa la probeta HP-1_1, la línea verde la HP-1_2, la morada la HP-1_3 y la roja representa el promedio de las tres.

Tabla 2: resultado ensayo de caracterización de resistencia residual.

PROBETA	$f_{L,i}$ [MPa]	$f_{R1,i}$ [MPa]	$f_{R2,i}$ [MPa]	$f_{R3,i}$ [MPa]	$f_{R4,i}$ [MPa]
HP-1_1	4,89	3,64	4,19	4,1	3,91
HP-1_2	4,92	4,17	4,28	4,59	4,44
HP-1_3	4,98	3,46	4,38	4,3	4,14
$f_{Rj,m}$ [MPa]	4,93	3,76	4,29	4,33	4,16
s	0,05	0,37	0,52	0,44	0,55
CV	0,90%	9,90%	12,10%	10,80%	14,10%

Tabla 3: resultados de ensayos a compresión.

PROBETA	f'_c [MPa]
1	49,2
2	52,3
3	47,5
$f_{c,m}$ [MPa]	49,6

4.3. Ensayo Creep

El procedimiento general se divide en tres etapas principales como se muestra en la Fig. 1, pero para el presente informe se analizarán las dos primeras etapas. Las etapas son: Pre-cracking (O-C) y Creep (D-G).

4.3.1. Etapa Pre-cracking (O-C)

En la etapa del pre-agrietamiento, una vez listas y curadas siguiendo la normativa, se prefisuraron las probetas siguiendo el procedimiento EN14651 como se muestra en la Fig.13, con la configuración de carga 3PBT. Se realizó hasta alcanzar $CMOD_{pn}$ de 0,5 mm, que corresponde a la tensión residual ($f_{R,1}$). Para este ensayo se pre-agrietaron 20 probetas, y de esta manera se pudo elegir las que tuvieron menor variación.



Figura 13: ensayo Pre-cracking realizado en laboratorio.

Al completar la fase de pre-agrietamiento hasta el valor $CMOD_{pn}$, se procedió a la descarga inmediata de la probeta a una velocidad de 0,2 mm/min. Tras la liberación total de la carga ($CMOD_{pri}$) el sistema de adquisición de datos monitoreó durante un intervalo de 10 minutos. Este período permitió registrar la evolución de las deformaciones por recuperación retardada hasta estabilizar el valor.

Los parámetros que se buscan obtener se pueden observar en la Fig, 14, donde se grafica lo que representa cada uno.

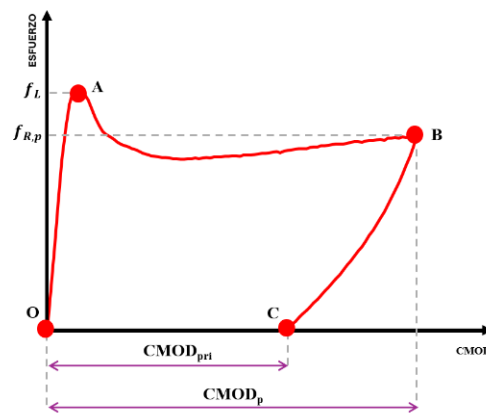


Figura 14: Definición de parámetros de la etapa previa al agrietamiento para muestras de FRC de comportamiento de ablandamiento.

A continuación, en la Fig. 15 y Fig. 16 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de pre-agrietamiento de la muestra HP-1 del año 2024 (Serie A) y 2025 (Serie B) que serían cargadas con un 50%.

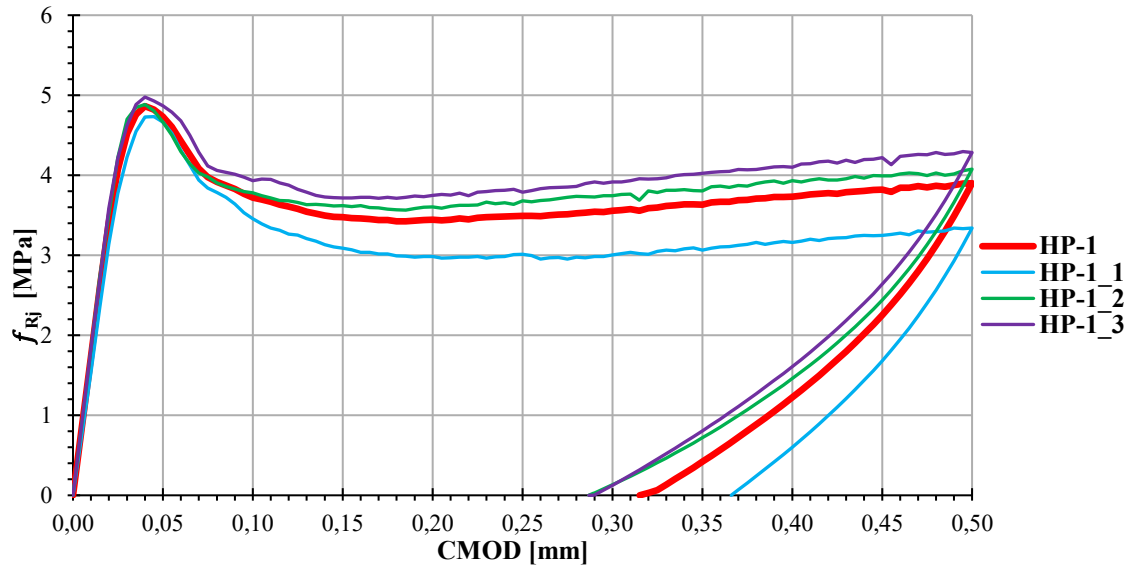


Figura 15: Curvas obtenidas durante la etapa de pre-agrietamiento de la SERIE A 50%.

Tabla 4: Resultado de pruebas de pre-agrietamiento de la SERIE A 50%.

PROBETA	$f_{R,p}$ [MPa]	CMOD _{pri} [mm]
HP-1_1	3,3	0,366
HP-1_2	4,1	0,289
HP-1_3	4,3	0,290
Promedio	3,9	0,315 (0,140)

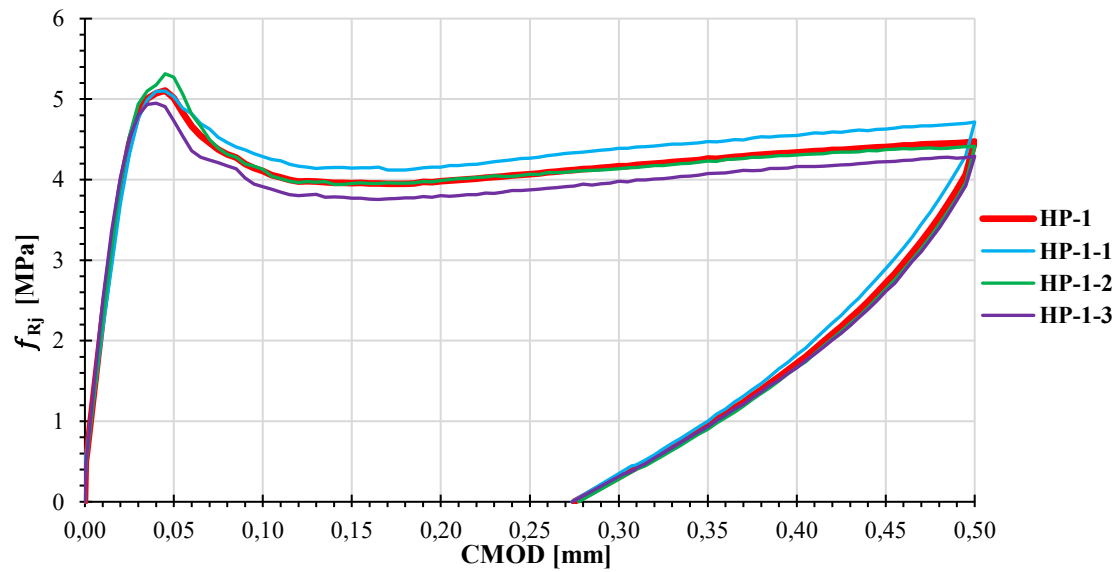


Figura 16: Curvas obtenidas durante la etapa de pre-agrietamiento de la SERIE B 50%.

Tabla 5: Resultado de pruebas de pre-agrietamiento de la SERIE B 50%.

PROBETA	$f_{R,p}$ [MPa]	CMOD _{pri} [mm]
HP-1_1	4,7	0,274
HP-1_2	4,4	0,277
HP-1_3	4,3	0,274
Promedio	4,5	0,275 (0,008)

Asimismo, en la Fig. 17 se observa el gráfico de pre-agrietamiento obtenido el 2025 para las probetas que serían ensayadas con el 100% de carga (Serie B). Respecto a la probeta HP-1_1 2025 para ensayarla en creep al 100%, esta no registró la descarga. Las otras dos sí registraron, y se pudo calcular el promedio de descarga con ambas.

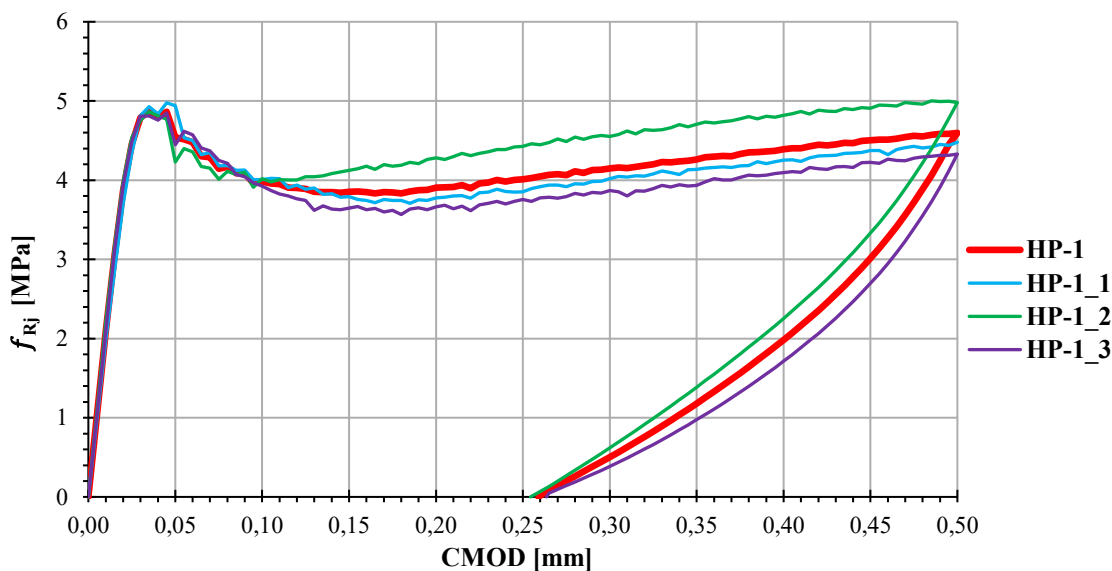


Figura 17: Curvas obtenidas durante la etapa de pre-agrietamiento de la SERIE B 100%.

Tabla 6: Resultado de pruebas de pre-agrietamiento de la SERIE B 100%.

PROBETA	$f_{R,p}$ [MPa]	CMOD _{pri} [mm]
HP-1_1	4,5	-
HP-1_2	5,0	0,254
HP-1_3	4,3	0,263
Promedio	4,6	0,259 (0,025)

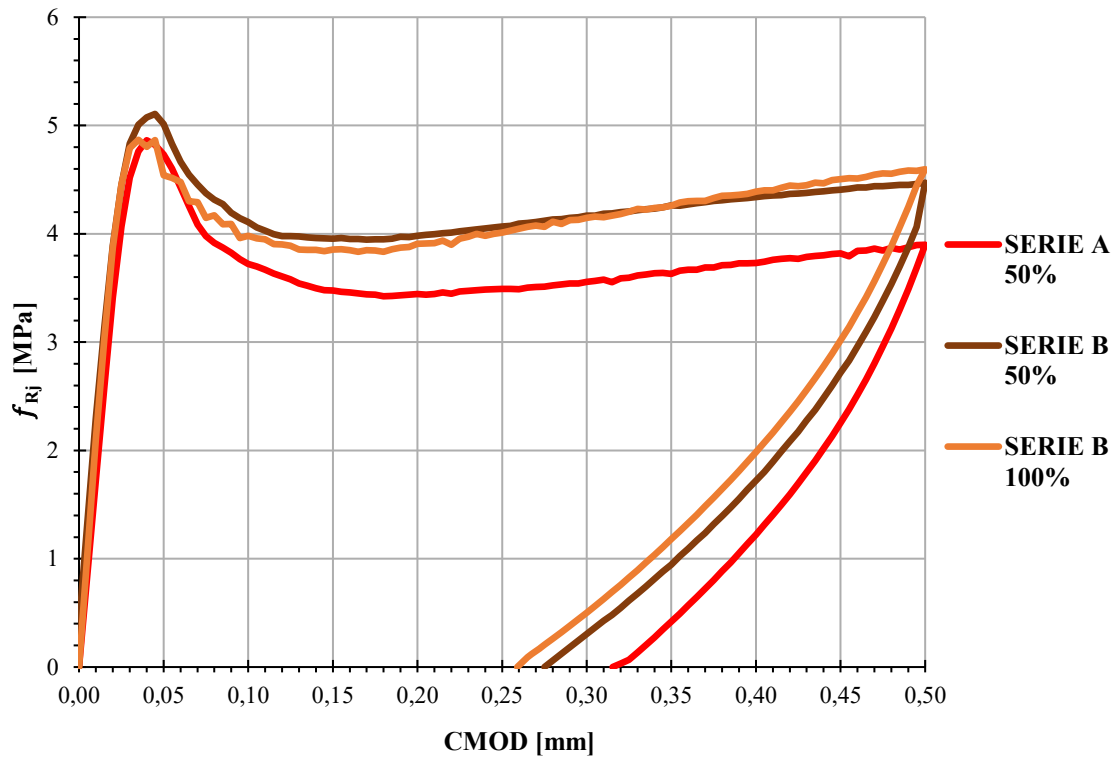


Figura 18: curvas de promedio de pre-agrietamiento.

Respecto al ciclo de descarga, como se mencionó anteriormente esta se realiza a una velocidad constante de 0,2 mm/min, manteniendo en todo momento el control mediante el sensor de CMOD. Esta descarga tiene como objetivo liberar a la probeta de toda sollicitación externa, permitiendo observar en el gráfico la recuperación elástica.

A partir de los datos obtenidos en esta fase de descarga, se pueden extraer parámetros fundamentales que describen como interacciona la matriz de hormigón y el refuerzo metálico (fibras). La forma de la curva de descarga, esquematizada en la Fig.19, demuestra el estado de las fibras después del agrietamiento y la capacidad de recuperación que tienen a través de tangentes y 3 indicadores claves:

- Pendiente S_p correspondiente a la pendiente de la recta tangente de la curva de descarga en $\text{CMOD}=0,5\text{mm}$.
- CMOD_{pri} correspondiente a la apertura remanente de la fisura cuando la viga está completamente descargada.

- Pendiente S_{pri} correspondiente a la pendiente de la recta tangente a la curva totalmente descargada al momento en que la viga se encuentra totalmente descargada.

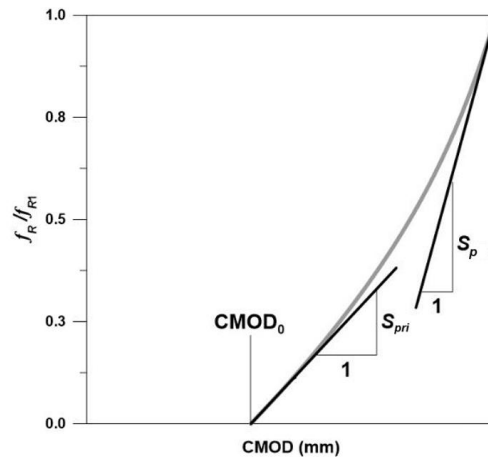


Figura 19: esquema de curva de descarga.

Para el caso de este ensayo, las curvas de descargas respectivas se pueden apreciar en los gráficos de pre-agrietamiento, o bien, el promedio de estas, del año 2024 (50%) y 2025 (50% y 100%) en la Fig. 20, y los parámetros extraídos en la Tabla 7.

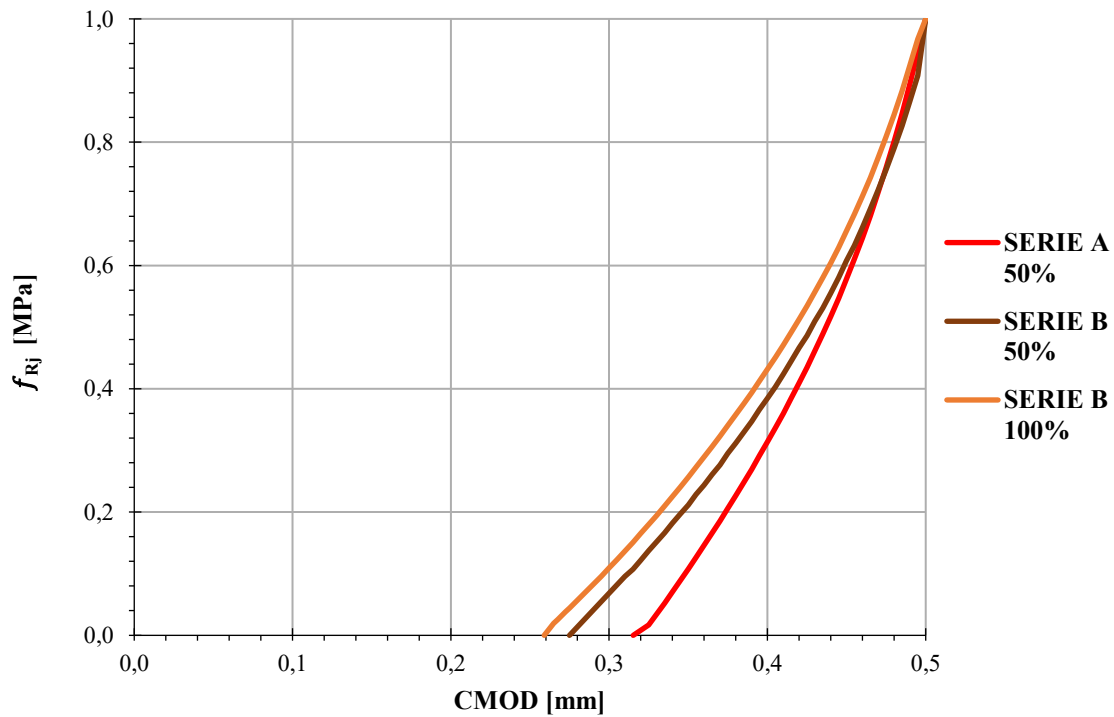


Figura 20: curvas de descarga promedio normalizadas en 0 y 1.

Tabla 7: datos obtenidos de curva de descarga de Serie A y Serie B.

Probeta	S_{p1}/mm	$\text{CMOD}_{\text{pri}} [\text{mm}]$	$S_{\text{pri}} 1/\text{mm}$
SERIE A 50%	11,575	0,314	1,704
SERIE B 50%	13,075	0,275	1,380
SERIE B 100%	9,025	0,314	3,037

Una vez terminado el ensayo, la probeta fue trasladada a la sala climática del ensayo creep, donde estuvo por una semana para adaptarse a las condiciones climáticas antes de colocarse en los marcos de fluencia. Acá se mantuvieron condiciones ambientales controladas, con una temperatura de $20 \pm 3^\circ\text{C}$ y una humedad relativa (HR) del 50%, para así disminuir los efectos de retracción.

4.3.2. Etapa Creep (D-G)

En esta fase se induce un nivel de esfuerzo sostenido sobre las probetas pre-agrietadas. Se utilizará un Índice de Creep (I_c) nominal del 50% y 100% de la resistencia residual $f_{R,p}$ (evaluada en el $\text{CMOD}_p = 0,5$), con una tolerancia de variación de carga del $\pm 5\%$. El control de carga se realizará preferentemente mediante una celda de carga Clase 1.

Al montar las probetas sobre el marco, se respetó el procedimiento mostrado en la Fig. 21, considerando la configuración 4PBT.

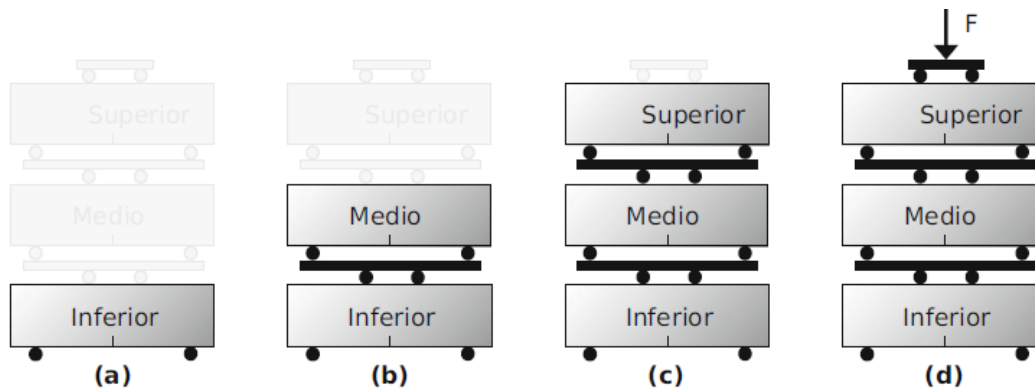


Figura 21: Procedimiento de montaje de probetas (RILEM 2021)

Respecto al marco metálico utilizado, este funciona como una palanca de segundo grado accionada por un contrapeso, cuya fuerza constante se transfiere verticalmente mediante barras roscadas y una placa hacia una celda de carga que la monitorea. Finalmente, esta fuerza se aplica sobre las probetas a través de un elemento corto que genera dos puntos

de presión superiores, mientras que la base de la muestra descansa sobre elementos largos en los extremos, proporcionando los apoyos inferiores necesarios.



Figura 22: probetas Dramix con 50% montadas en marcos según RILEM 2021.

Una vez montadas las probetas de forma correcta (Fig.22), se procede a conectar los sensores de desplazamiento (LVDT), que permiten medir la deformación de las vigas producto del Creep. Por otra parte, las celdas de carga miden la fuerza aplicada sobre las probetas, asegurando que la carga se mantenga constante durante el ensayo. Todos los datos tomados por minuto son almacenados y esquematizados, como se muestra en la Fig. 23.



Figura 23: sistema de adquisición de datos Creep en LEMCO.

Respecto a los datos extraídos, se les calculó un factor de corrección de CMOD, mediante el coeficiente entre la altura de la probeta y la distancia hasta el transductor, como se muestra en la ec.3.

$$Factor\ corrección\ CMOD = \frac{150}{170} = 0,88 \quad ec. (3)$$

Debido a la configuración de carga, para determinar la carga a aplicar en el ensayo creep se utilizan la Ec.1 y 2 ya que se considera la configuración 3PBT en pre-agrietamiento y 4PBT para creep, y al desarrollarla queda lo siguiente:

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{F_{3PBT} \cdot 500}{150 \cdot 125^2} = \frac{F_{4PBT} \cdot 450}{150 \cdot 125^2} \quad ec. (4)$$

Dónde $l_{3PBT} = 500$ mm y $l_{4PBT} = 450$ mm; F_{3PBT} y F_{4PBT} , son las cargas y los espaciamientos de la viga en las configuraciones 3PBT y 4PBT, respectivamente; $b = 150$ mm $h_{sp} = 125$ mm (ancho y altura de la viga, respectivamente). Al resolver la ecuación con estos valores se obtiene:

$$F_{4PBT} = 1.667 \cdot F_{3PBT} \quad ec. (5)$$

Considerando que $F_{4PBT} = P_{cr}$ y $F_{3PBT} = P_{R1}$, y que para esta investigación se compararán los efectos de la carga creep al 50% y el 100%, es que quedan la ec. 6 y ec. 7 respectivamente; además de la carga a aplicar en el marco mostrada en la Tabla 8.

$$P_{cr} = 0.833 \cdot P_{R1} \quad ec. (6)$$

$$P_{cr} = 1.667 \cdot P_{R1} \quad ec. (7)$$

Tabla 8: carga a aplicar en ensayo creep

Muestra	SERIE A 50%	SERIE B 50%	SERIE A 100%
P_{R1} [N]	12.188	14.063	14.375
$f_{R,p}$ [MPa]	3,90	4,50	4,60
I_c	0,50	0,50	1,00
Esfuerzo de Creep [MPa]	1,95	2,25	4,60
Carga de Creep P_{cr} [N]	10.153	11.714	23.963

Aplicando las cargas mostradas en la Tabla 8, se obtienen los siguientes resultados del ensayo después de 80 días de la Serie A 50%, arrojan el siguiente gráfico (Fig.24) y con estos datos se completó la Tabla 9, que corresponde a la apertura a los 80 días:

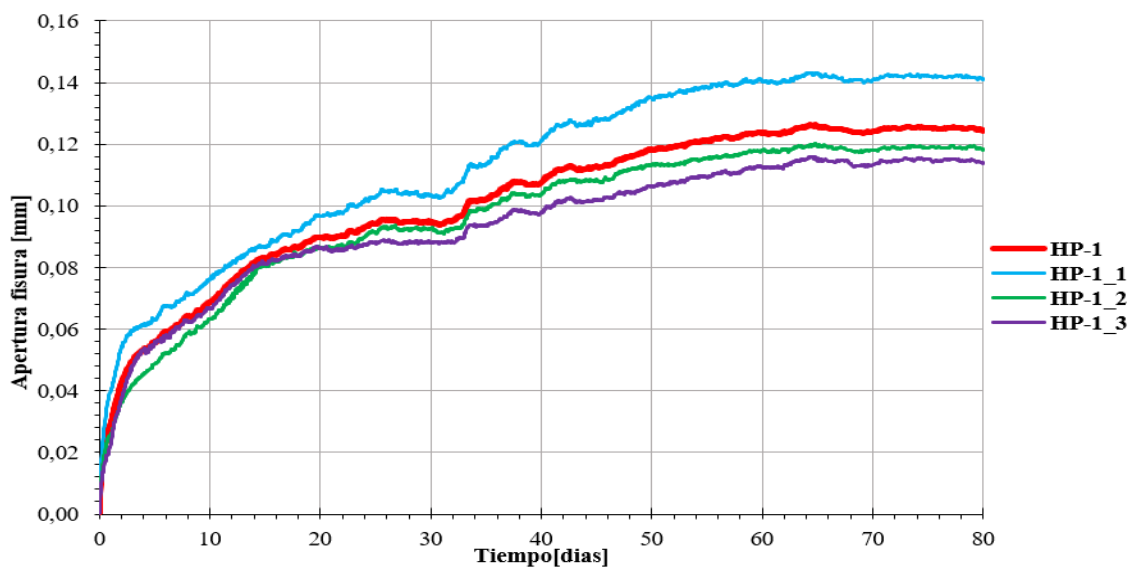


Figura 24: curvas Creep a los 80 días con una carga del 50% (SERIE A).

Tabla 9: apertura de la fisura mm a los 80 días con una carga del 50% (SERIE A).

PROBETA	$CMOD_{cd}^{80}[\text{mm}]$
HP-1_1	0,141
HP-1_2	0,118
HP-1_3	0,114
$CMOD_{cd, m}^{80}$	0,124

A continuación, se presenta el gráfico y tabla (Fig.25, Fig.26 y Tabla 10) del ensayo después de 80 días de las muestras del 2025 con un 50% de la carga.

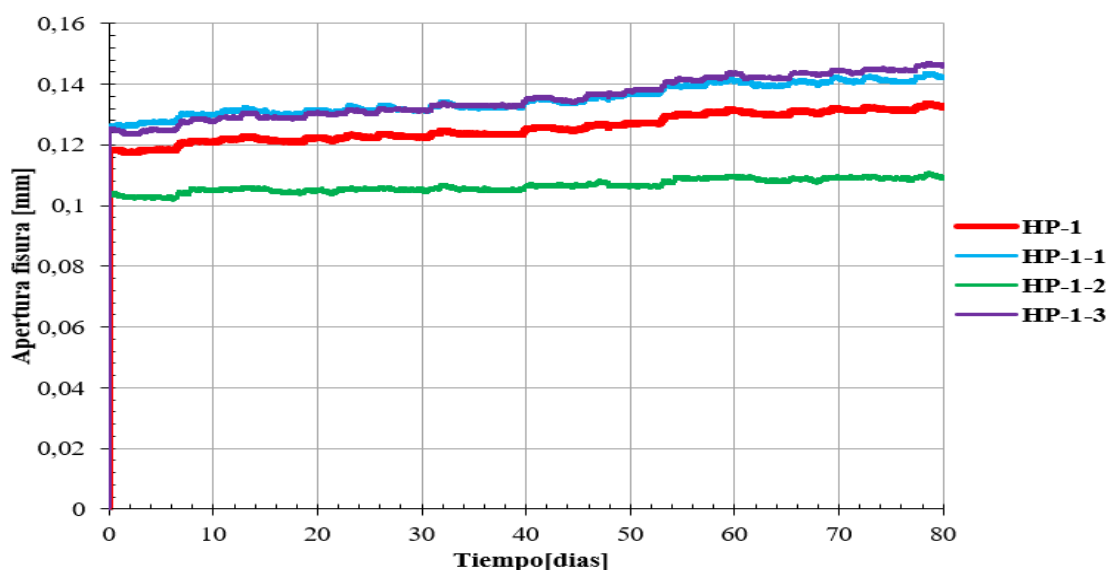


Figura 25 : curvas Creep a los 80 días con una carga del 50% (SERIE B).

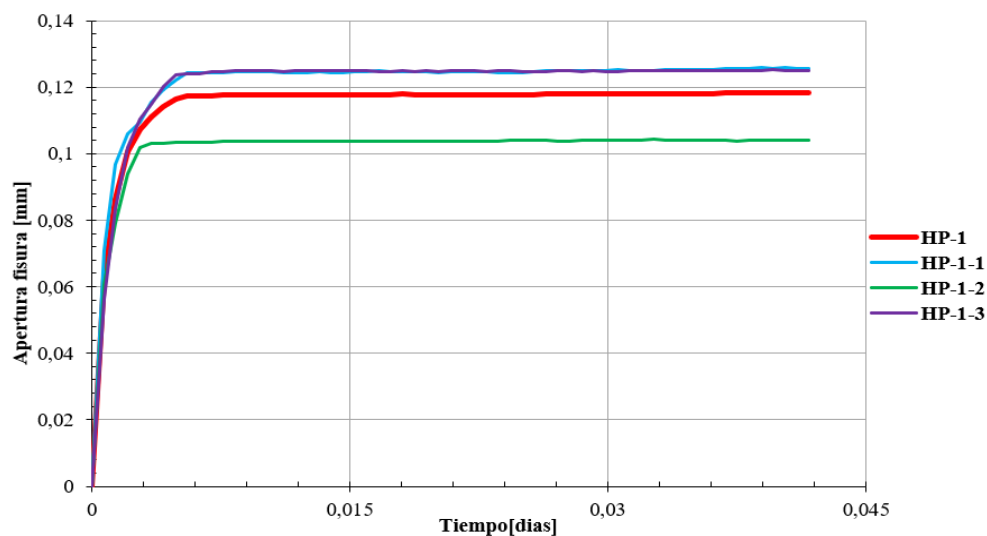


Figura 26: curvas Creep a los 7 minutos con una carga del 50% (SERIE B).

Tabla 10: apertura de la fisura mm a los 80 días con una carga del 50% (SERIE B)

PROBETA	$CMOD_{cd}^{80}$ [mm]
HP-1 1	0,142
HP-1 2	0,109
HP-1 3	0,146
$CMOD_{cd, m}^{80}$	0,133

Por otra parte, los resultados del ensayo después de 80 días de las muestras con un 100% de la carga, arrojan el siguiente gráfico (Fig.27 y Fig. 28) y con estos datos se completó la Tabla 11, que corresponde a la apertura a los 80 días. Además, se muestra cómo progresa la carga los primeros 3 días, ya que acá se modificó la carga, dando un salto notorio en el CMOD. También se menciona que solo se utilizaron 2 muestras, ya que la muestra HP-1_3 dio valores de apertura de fisura muy altos, generando una desviación notoria en el promedio.

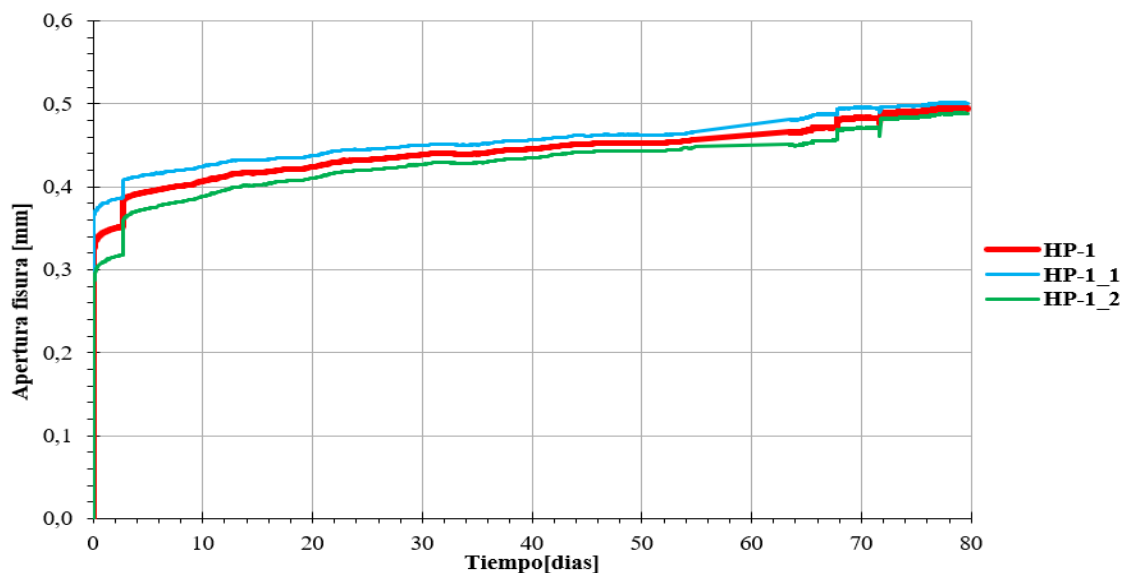


Figura 27: curvas Creep a los 80 días con una carga del 100% (SERIE B)

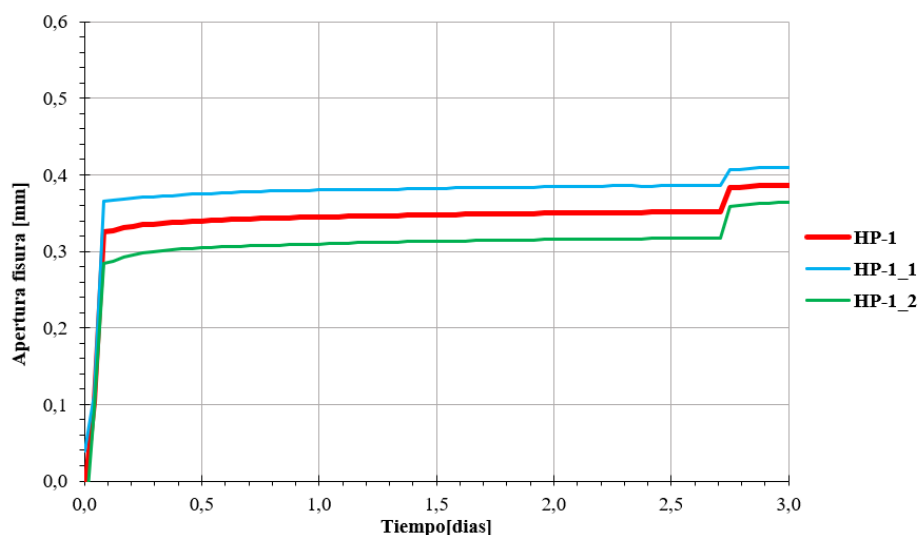


Figura 28: curvas Creep a los 3 días con una carga del 100% (SERIE B)

Tabla 11: apertura de la fisura mm a los 80 días con una carga del 100% (2025)

PROBETA	$CMOD_{cd}^{80}[\text{mm}]$
HP-1 1	0,500
HP-1 2	0,488
$CMOD_{cd, m}^{80}$	0,746

En la Fig. 27 y Tabla 12, se muestra la comparación entre promedios de ensayo Creep con el 50% del 2024 y 2025 y el 100% del 2025.

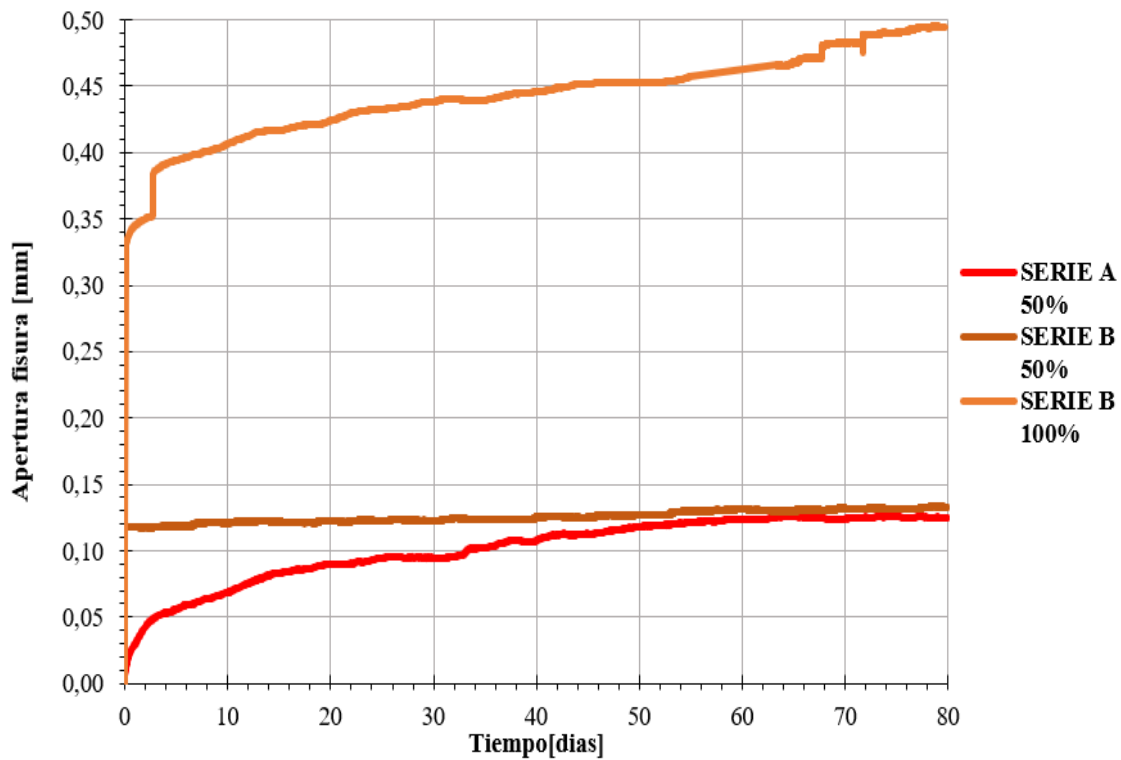


Figura 29: comparación entre promedios de ensayo Creep Serie A (50%) y Serie B (50% y 100%).

Tabla 12: apertura de la fisura de promedios de ensayo Creep Serie A (50%) y Serie B (50% y 100%).

MUESTRA	$CMOD_{cd}^{80}[\text{mm}]$
SERIE A 50%	0,124
SERIE B 50%	0,133
SERIE B 100%	0,746

5. Análisis de resultados

Al comparar las curvas de pre-agrietamiento, se observa una diferencia en la tensión residual de un 15 % aproximado, de la Serie A ($f_{R,p} = 3,9$) y Serie B ($f_{R,p} = 4,6$ y $f_{R,p} = 4,5$), a pesar de que estas comparten la misma dosificación de fibras de 30 kg/m³ y hayan sido fabricadas con la misma muestra de hormigón. Esto se debe al proceso de hidratación tardía que experimenta el hormigón a lo largo del tiempo, lo que mejora la resistencia de la probeta. Este fenómeno coincide con lo expuesto por Naville (2011) quien señala “En un hormigón bien curado y mantenido bajo condiciones de humedad favorables, los núcleos de cemento no hidratados continúan reaccionando con el agua durante períodos prolongados. Este proceso de hidratación tardía conduce a una reducción continua de la porosidad y a un aumento sustancial en la fuerza de adherencia (*bond strength*) entre la pasta de cemento y los áridos o refuerzos embebidos”.

También se puede apreciar en las curvas de descarga, que la Serie B 50% tiene una mayor pendiente ($S_p=13,075$) de descarga que las otras dos, esto se puede deber a que dicha probeta sufrió un menor daño interno o menor deslizamiento de las fibras durante la carga inicial en comparación con las otras, así como también a que una matriz cementicia está más envejecida y posee un módulo de elasticidad más alto lo que deriva en una mayor rigidez, permitiendo cerrar de mejor forma la grieta al retirar la carga de pre-agrietamiento.

Este comportamiento es sustentado por Signorini y Volpini (2021), quienes mencionan “La rigidez de descarga en elementos reforzados con fibra está profundamente gobernada por el estado de microfisuración de la “funda” de hormigón que sujeta a las fibras. Una matriz bien curada y de mayor edad limita el deslizamiento por arrancamiento durante el pre-agrietamiento, preservando el anclaje mecánico del gancho y maximizando el potencial de recuperación elástica cuando se libera la carga externa”.

Respecto al ensayo creep, al comparar la Serie A y Serie B con una carga del 50%, se presentan discrepancias en la velocidad en la que se estabilizan ambas. Por un lado, la Serie B, muestra una fase de fluencia primaria la cual concluye a los 3 días aproximadamente, lo cual indica una estabilización casi instantánea del CMOD, después de ese tiempo la curva tiende a tener una horizontalidad. Por lo contrario, la Serie A, con un 50% de carga, muestra un periodo de estabilización mucho mayor, logrando una mayor horizontalidad en la curva

después de los 50 días de ensayo. Esta discrepancia se debe a que la Serie A fue ensayada a una edad más temprana (matriz joven).

Por otra parte, si analizamos la pendiente (ec. 12 y ec. 13) de ambos gráficos después de los 55 días, podemos notar como la pendiente de estas se asimilaran, lo cual demuestra que una vez superada la etapa de fluencia básica, el comportamiento en el régimen secundario queda gobernado por el mecanismo que ejercen las fibras de acero.

$$m_{SERIE A 50\%} = \frac{0,124-0,121}{80-55} = 0,00013 \quad \text{ec.(12)}$$

$$m_{SERIE B 50\%} = \frac{0,133-0,130}{80-55} = 0,00010 \quad \text{ec.(13)}$$

Al evaluar la Serie B 100%, lo primero que se puede notar es que esta alcanza instantáneamente un CMOD aproximadamente 4 veces mayor que la Serie B al 50%. También a diferencia de las probetas cargadas al 50%, donde las curvas alcanzan una horizontalidad, estas mantienen una pendiente que indica una tasa de apertura de fisura casi continua en el tiempo. Si calculamos la pendiente de esta una vez que se ha estabilizado (después de los 3 días) nos da como resultado el siguiente valor:

$$m_{SERIE B 100\%} = \frac{0,494-0,387}{80-3} = 0,0014 \quad \text{ec.(14)}$$

Este valor es un poco más de 12 veces mayor que las pendientes de las Serie A y Serie B al 50%. Demostrando que bajo niveles de esfuerzos extremos (100%), el deterioro del interfaz fibra-matriz no se detiene, provocando una apertura de la fisura mucho mayor en comparación con las otras, debido a que el material ingresa a un régimen de fluencia no lineal.

MUESTRA	$CMOD_{cd}^{80}[\text{mm}]$
SERIE A 50%	0,124
SERIE B 50%	0,133
SERIE B 100%	0,746

Si comparamos todos los valores de $CMOD_{cd}^{80}$, después de calcular el promedio entre las dos series cargadas al 50% (=0,128 mm) y compararlo con la Serie B 100%, que alcanza un valor de $CMOD_{cd}^{80}=0,746$ mm, se demuestra que esta última es 4,8 veces mayor (un incremento del 480%). Este salto desproporcionado, demuestra que el fenómeno de creep no

es lineal, pasar de un índice de carga del 0,5 a 1,0 no duplica la deformación, sino que la aumenta de forma desproporcionada.

6. Conclusiones

El proceso de hidratación tardía de las probetas aumenta en un 15% aproximado la tensión residual en matrices de la Serie B, en comparación con la Serie A. Esto demuestra que el paso del tiempo densifica la zona de contacto con la fibra, mejorando el anclaje de los ganchos de las fibras.

Las pendientes de descarga confirman que un hormigón con más edad posee un mayor módulo de elasticidad lo que indica mayor rigidez. Al sufrir menos daño mecánico durante el pre-agrietamiento, el material conserva mayor energía elástica interna, lo que ayuda a cerrar más la grieta ($CMOD_{pri}$) al retirar la carga.

La velocidad para estabilizar la fluencia lenta en el ensayo creep depende de la edad de la probeta. En las muestras de la Serie A tarda cerca de 50 días en estabilizar su pendiente debido al reacomodo inicial y la fluencia básica de la pasta cementicia, mientras que en la Serie B se bloquea el deslizamiento casi inmediatamente, logrando la horizontalidad desde el tercer día.

Si visualizamos los tramos horizontales de las curvas de creep de la Serie A y B al 50%, se puede apreciar que, una vez estabilizada la matriz, la velocidad de deformación durante el paso del tiempo depende de la dotación de las fibras.

Al exigir al material al 100% de su resistencia residual, la deformación inicial es 4 veces mayor y la pendiente una vez estabilizada aumenta más de 12 veces respecto a las otras. Esto valida el ingreso a un régimen de fluencia no lineal donde el esfuerzo extremo, impide que las fibras se aferren a la matriz de hormigón, provocando que a los 80 días la apertura de la fisura resulte ser 4,8 veces mayor que el promedio de las series cargadas al 50%.

Este salto desproporcionado aclara que el creep en estado fisurado es altamente sensible al nivel de carga, lo que obliga a aplicar factores de reducción estrictos a la hora de realizar diseños estructurales, como son los túneles de la autopista AVO, para asegurar que

el material opere siempre dentro de un rango lineal y evitar fallas por pérdidas de adherencia interfacial de las fibras.

7. Bibliografía

- Abrishambaf, A., Barros, J. A. O., & Cunha, V. M. C. F. (2015). Time-dependent flexural behaviour of cracked steel fibre reinforced self-compacting concrete panels. *Cement and Concrete Research*, 72, 21–36.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.02.010>
- ACI Committee 544. (2018). *Guide for specifying, proportioning, and production of fiber-reinforced concrete (ACI 544.3R-16)*. American Concrete Institute.
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., Gálvez, J. C., & Ferreras, A. (2017). Pull-out behaviour and interface critical parameters of polyolefin fibres embedded in mortar and self-compacting concrete matrices. *Construction and Building Materials*, 112, 607–622.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.128>
- Américo Vespucio Oriente II. (2024a). *Proyecto de ingeniería de detalle, Concesión Américo Vespucio Oriente: Tramo Av. Príncipe de Gales–Los Presidentes, Dm 8.278,5–Dm 13.480,0. Volumen N.º 3.2: Especificaciones técnicas obras subterráneas*.
- Américo Vespucio Oriente II. (2024b). *Proyecto de ingeniería de detalle, Concesión Américo Vespucio Oriente: Tramo Av. Príncipe de Gales–Los Presidentes, Dm 8.278,5–Dm 13.480,0. Volumen N.º 5.2: Estructuras. Obras subterráneas*.
- Banthia, N., & Sappakittipakorn, M. (2007). Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization. *Cement and Concrete Research*, 37(9), 1366–1372. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.05.005>
- Barpi, F., & Valente, S. (2003). Creep and fracture in concrete: A fractional order rate approach. *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 611–623.
[https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(02\)00041-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(02)00041-3)
- Buratti, N., Ferracuti, B., & Savoia, M. (2013). Concrete crack reduction in tunnel linings by steel fibre-reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, 44, 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.063>
- Buratti, N., Mazzotti, C., & Savoia, M. (2011). Post-cracking behaviour of steel and macro-synthetic fibre-reinforced concretes. *Construction and Building Materials*, 25(5), 2713–2722. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.022>

- Di Prisco, M., Plizzari, G., & Vandewalle, L. (2009). Fibre reinforced concrete: New design perspectives. *Materials and Structures*, 42(9), 1261–1281. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9529-4>
- Fédération Internationale du Béton. (2013). *fib Model Code for concrete structures 2010*. Ernst & Sohn.
- Fédération Internationale du Béton. (2024). *fib Model Code for concrete structures 2020*. Fédération Internationale du Béton.
- Gettu, R., Mobasher, B., Carmona, S., & Jansen, D. C. (1996). Testing of concrete under closed-loop control. *Advanced Cement Based Materials*, 3(2), 54–71. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(96\)90072-3](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(96)90072-3)
- Kim, H. Y., Lee, H. J., Yang, K. H., & Kwon, S. J. (2024). Numerical approach for residual strengths of fibre-reinforced concrete beams with different densities. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 28(1), 220–230. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1819-9>
- Laranjeira, F., Molins, C., & Aguado, A. (2010). Predicting the pull-out response of inclined hooked steel fibres. *Cement and Concrete Research*, 40(10), 1471–1487. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.05.005>
- Li, B., Chi, Y., Xu, L., Shi, Y., & Li, C. (2018). Experimental investigation on the flexural behavior of steel-polypropylene hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 191, 80–94. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.202>
- Li, K., Yang, C., Huang, W., Zhao, Y., Wang, Y., Pan, Y., & Xu, F. (2021). Effects of hybrid fibers on workability, mechanical, and time-dependent properties of high strength fiber-reinforced self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 277, 122325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122325>
- Li, Y., Bao, X., Chen, X., Zhang, R., & Cui, H. (2024). Fracture behavior of low fiber content hybrid fiber reinforced concrete considering the shape of layered beams. *Construction and Building Materials*, 443, 137632. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137632>
- 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. <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01675-0>
- Ministerio de Obras Públicas de la República de Chile. (s. f.). *Proyecto de concesión de infraestructura hídrica*. <https://concesiones.mop.gob.cl/proyectos/Paginas/detalleHidricas.aspx?item=178>

- Oh, B. H., Park, D. G., Kim, J. C., & Choi, Y. C. (2005). Experimental and theoretical investigation on the post-cracking inelastic behavior of synthetic fiber reinforced concrete beams. *Cement and Concrete Research*, 35, 384–392.
- Plizzari, G., & Serna, P. (2018). Structural effects of FRC creep. *Materials and Structures*, 51, 167. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1290-0>
- Sur, M. N., Le, T. T., & Lampropoulos, A. P. (2012). Flexural behavior of steel and synthetic fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 36, 704–710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.042>
- Zheng, X., Ji, T., Easa, S. M., Zhang, B., & Jiang, Z. (2019). Tensile basic creep behavior of lightweight aggregate concrete reinforced with steel fiber. *Construction and Building Materials*, 200, 356–367. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.138>