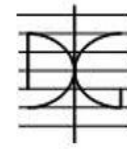




UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



DEPARTAMENTO
DE INGENIERÍA DE
LA CONSTRUCCIÓN
Y DE PROYECTOS DE
INGENIERÍA CIVIL

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DEL HORMIGÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER
CURSO ACADÉMICO 2020/2021

**Estudio del comportamiento mecánico de
hormigones reforzados con macrofibras
sintéticas sometidos a temperaturas moderadas.**

Autor/a: Najaronny de Jesús Castillo Rosario

Tutor/a: Dr. Prof. Pedro Serna Ros

Cotutor/a: Dra. Prof. Marta Roig Flores

Valencia, 12 de Julio de 2021

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE LA
CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**



MUIH

Agradecimientos

En primera instancia, doy gracias a Dios el creador de todo, por brindarme sabiduría y entendimiento para poder superar los obstáculos presentados durante estos dos años de estudio continuo.

Gracias al Ministerio de Educación Superior, Ciencia y Tecnología (MESCYT), la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) y el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), por darme la oportunidad de crecer y ampliar mis conocimientos en esta disciplina de la ingeniería.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mis tutores, Dr. Pedro Serna y la Dra. Marta Roig Flores, por ser mis guías en este largo camino, por compartir sus conocimientos y experiencias conmigo. Asimismo, a la directora del máster Dra. Carmen Castro y la Ing. Marta Caballero Jorna, a pesar de ser mis tutores, maestros y compañeros, se han convertido en amigos de por vida.

A toda mi familia, en especial a mi madre Juana Rosario has sido mi mejor ejemplo a seguir, siempre brindándome tu apoyo incondicional y guiándome por el camino correcto. A mi compañera de vida Gabriela Villa por estar ahí presente brindándome el ánimo y el apoyo que necesitaba, a mis hermanos (Nea Moreto, Alex, Jordan, Paola y Brenda Castillo) por ser el soporte y sostén para hacer realidad esta meta. A mi cuñada Paula Carbonell, gracias por el apoyo brindado.

A mis amigos de siempre y colegas del máster por ayudarme a seguir adelante, esperando que la distancia no nos separe y se mantenga siempre encendida la llama que nos une.

Resumen

En los últimos años el uso de hormigones reforzados con fibras (FRC) en la industria de la construcción ha aumentado significativamente, apoyado en los avances de la investigación y nuevos códigos. Estos materiales presentan ventajas importantes en comparación con el hormigón reforzado con armadura tradicional. El hormigón reforzado con fibras sintéticas (SNFRC) conduce a mejoras en términos de comportamiento en servicio del hormigón, aumento en la durabilidad debido a la reducción del ancho de fisuras y de la permeabilidad.

Sin embargo, existe preocupación sobre la influencia que pueda generar la sensibilidad de los SNFRC a cambios de temperatura debido a su efecto sobre las propiedades de los plásticos.

Por ello, se decide estudiar los efectos que provocan diferencias de temperaturas en un rango definido como moderadas (-15°C , 20°C y 60°C) sobre los hormigones reforzados con fibras poliméricas. El concepto de “moderado” hace referencia a que este rango está limitado a valores que cubren la mayoría de los niveles térmicos que pueden presentarse en algún lugar del mundo habitado con relativa frecuencia.

Se llevó a cabo un programa experimental centrado en la evaluación del comportamiento a flexotracción a tres puntos sobre probetas conservadas a las temperaturas seleccionadas y adaptando el ensayo de la norma UNE-EN 14651 para poder aplicar la carga mientras se mantenía constante dicha temperatura. Se analizaron también la resistencia a compresión, las propiedades del hormigón fresco tales como la consistencia y el contenido de aire.

Contenido

CAPÍTULO I- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1 Introducción	2
1.2 Objetivos	3
CAPÍTULO II- ESTADO DEL ARTE	4
2.1 Introducción al hormigón reforzado con fibras (FRC)	5
2.2 Tipos de fibras para el hormigón	6
2.2.1 Según su comportamiento	7
2.2.2 Según su tamaño.....	8
2.2.3 Según el material.....	9
2.3 Hormigón reforzado con fibras metálicas y sintéticas	13
2.3.1 Hormigón reforzado con fibras metálicas (SFRC).....	13
2.3.2 Hormigón reforzado con fibras sintéticas (SNFRC)	15
2.4 Incorporación de las fibras en los códigos	18
2.5 Aplicaciones y Requisitos	20
2.6 Durabilidad del hormigón reforzado con fibras frente a temperaturas moderadas	21
2.7 Degradación de fibras de polipropileno	22
2.8 Influencia de la temperatura en las estructuras de hormigón reforzadas macrofibras sintéticas	23
CAPÍTULO III- PROGRAMA EXPERIMENTAL	27
Introducción	28
3.1 Programa Experimental	28
3.2 Materiales	29
3.2.1 Cemento	29
3.2.2 Agua	30
3.2.3 Agregados.....	30
3.2.4 Superplastificante	32
3.2.5 Fibras.....	32
3.4 Metodología	33
3.4.1 Dosificación y amasado	33
3.5 Ensayos de control del hormigón	35
3.5.1 Consistencia	35
3.5.2 Contenido de aire	36

3.6 Resistencia a compresión a temperatura ambiente	37
3.7 Métodos para la exposición a temperaturas moderadas	38
3.7.1 Equipos para la exposición a temperaturas moderadas	41
3.8 Ensayos a temperatura	43
3.8.1 Resistencia a compresión a temperaturas moderadas.....	43
3.9 Ensayos a flexotracción sometidos a temperaturas moderadas	44
3.9.1 Ensayo a flexotracción estándar	44
3.9.2 Modificaciones para realizar el ensayo a temperaturas moderadas.....	49
3.9.3 Variación de las temperaturas durante los ensayos	51
CAPÍTULO IV- RESULTADOS Y ANÁLISIS	54
Introducción	55
4.1 Resultados de control	55
4.1.1 Consistencia	55
4.1.2 Aire ocluido y densidad.....	56
4.2 Resistencia a compresión a temperatura ambiente	57
4.3 Ensayos a temperaturas moderadas	59
4.3.1 Resistencia a compresión a temperaturas moderadas.....	59
4.3.2 Ensayo a flexotracción a -15 °C. (PF1-P PF1-N y SF1 P SF1 N).....	61
4.3.3 Ensayo a flexotracción a 20 °C. (PF1-P, PF1-N, SF1-P y SF1-N)	67
4.3.4 Ensayo a flexotracción a 60 °C. (PF1-P PF1-N y SF1 P SF1 N)	71
4.3.5 Análisis de condiciones pre-fisuradas y no pre-fisuradas a temperaturas (-15°C, 20°C y 60°C).	77
4.3.6 Evolución de parámetros (F_{LOP} , fr_1 y fr_3) respecto a la temperatura.	79
4.4 Discusión	82
CAPÍTULO V- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	84
5.1 Conclusiones	85
5.2 Futuras líneas de investigación	86
REFERENCIAS	87
APÉNDICE	89

CAPÍTULO I- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

El Fiber Reinforced Concrete (FRC) ha experimentado un gran desarrollo desde su aparición hasta la fecha, gracias a estudios realizados por investigadores de todo el mundo. Sin embargo, aún existen numerosas incógnitas por descubrir referente a su comportamiento estructural sometido a diferentes condiciones.

De acuerdo con (Giaccio, 2015) el estudio del comportamiento del hormigón reforzado con fibras sintéticas representa un punto clave de interés, debido a que la capacidad de servicio del material dependerá de su capacidad de transferir las tensiones sostenidas a través de las fibras y la estabilidad de las fisuras.

El desarrollo de Synthetic Fiber Reinforced Concrete (SNFRC) con alto módulo elástico ha permitido y promovido un mayor uso de las mismas, dado que estas fibras poseen una serie de beneficios, tales como: características estructurales, contribuyen a la resistencia del material, son químicamente inertes y su comportamiento estable en ambientes alcalinos, representan una solución muy interesante en los proyectos de construcción de hoy en día. Su tipología no sólo las convierte en una adición estructural viable, sino es una de las opciones más económicas utilizadas en los proyectos que requieren fibras por los grandes aportes que estas proveen.

El SNFRC posee una amplia gama de aplicaciones, tales como: revestimiento de túneles, mejoramiento de soleras, pistas de aeropuertos, estructuras prefabricadas, entre otros usos de carácter no estructural.

Existe preocupación con el SNFRC, se cree que su comportamiento resistente frente a temperaturas elevadas se ve reducido, esta disminución podría ser debido a la degradación de las propiedades de los plásticos principalmente por el proceso de oxidación. Sin embargo, a temperaturas bajas su resistencia aumenta entre un 13% y un 34% respecto a la correspondiente a temperatura ambiente. (Richardson & Ovington, 2017).

En vista de estos beneficios y la preocupación que existe sobre el uso de fibras en el hormigón bajo condiciones de temperatura, se decide estudiar los efectos que causan las temperaturas moderadas en el FRC bajo el rango de (-15°C, 20°C y 60°C). Se llevó a cabo una campaña experimental en la que se ensayaran 84 probetas prismáticas y 36 probetas

cubicas en SNFRC y Steel Fiber Reinforced Concrete (SFRC) siguiendo el procedimiento indicado en la norma UNE-EN-14651 con la finalidad de determinar la respuesta mecánica, incluyendo la resistencia residual y el comportamiento estructural frente a las temperaturas indicadas. Se incluye como variable el hecho de conservar las probetas expuestas a las temperaturas de estudio en estado pre-fisurado y no pre-fisurado,

Algunas hipótesis plantean que las propiedades estándar del hormigón como la resistencia a compresión, resistencia a la tracción, el módulo de rotura y el módulo de elasticidad pueden aumentar notablemente a baja temperatura (Rocco & Planas, 2013) y disminuir a altas temperaturas, algunas de estas interrogantes serán contestadas en este trabajo de investigación.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es conocer el comportamiento mecánico del hormigón reforzado con macrofibras sintéticas (SNFRC) a temperaturas moderadas (-15°C, 20°C y 60°C) y compararlo con el comportamiento de hormigón reforzado con fibras de acero (SFRC). En concreto, los objetivos específicos son:

1. Analizar la bibliografía existente respecto al hormigón reforzados con fibras sometido a temperaturas moderadas.
2. Caracterizar mediante ensayos de flexotracción hormigones reforzados con fibras sintéticas y de acero expuestos a temperaturas moderadas antes y durante el ensayo. Para ello se analizarán el límite de proporcionalidad elástico (F_{LOP}) y las resistencias residuales (fr_1 y fr_3).
3. Analizar el efecto de la presencia de una fisura de tamaño de servicio (0,5 mm) en el momento de la exposición a la temperatura
4. Conocer la influencia de las temperaturas moderadas sobre la resistencia a compresión del hormigón reforzado con macrofibras poliméricas y de acero.

CAPÍTULO II- ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción al hormigón reforzado con fibras (FRC)

El comportamiento frágil y baja resistencia a tracción del hormigón puede ser considerado como una de las principales desventajas para su uso en aplicaciones estructurales (Shanaka K. Baduge, et al, 2020). La inclusión de una cantidad adecuada de fibras a la mezcla de concreto ha sido una de las prácticas más habituales para mejorar la resistencia a flexión, tracción y por ende su ductilidad.

De acuerdo a las instrucciones del EHE, 2008, los hormigones reforzados con fibras se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. La función de las fibras consiste fundamentalmente en mantener unidas las fisuras que aparecen en el hormigón y evitar su propagación. Las fibras más pequeñas ayudan a que no se propaguen las pequeñas fisuras, mientras que las fibras más grandes mantienen unidas las fisuras de mayor tamaño aportando resistencias residuales tras la rotura del elemento (EHE, 2008). Soportan esfuerzos de tracción que transmiten por adherencia al hormigón, controlan la fisuración y reducen la intensidad de la misma a la vez que mejoran la tenacidad. La Figura 1 muestra el comportamiento conceptual carga-abertura de fisura de un ensayo a flexión en matrices con y sin fibras.

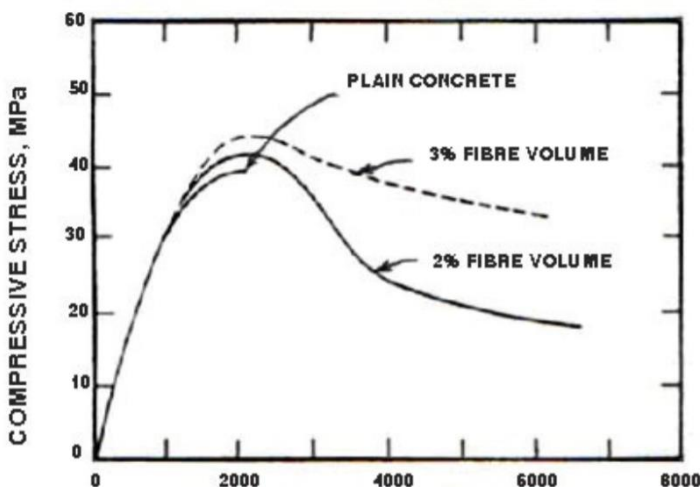


Figura 1 Curva típica carga-abertura de fisura para matrices con y sin fibras.
(Adeyanju & Manohar, 2011)

Las fibras son empleadas en aplicaciones estructurales en busca de beneficios adicionales en cuanto a reducción de mano de obra, incremento de la durabilidad y reducción o eliminación del refuerzo tradicional.

2.2 Tipos de fibras para el hormigón

Las fibras son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón con el fin de conferirle ciertas propiedades específicas, tales como: tenacidad, absorción de energía, ductilidad, mejor comportamiento estructural, entre otras.

De acuerdo a la Figura 2 las fibras en el hormigón se pueden clasificar según su comportamiento, su naturaleza y su longitud. Según su comportamiento pueden ser (estructurales o no estructurales), según su naturaleza (acero, poliméricas, naturales y de vidrio), en cambio, según su tamaño se pueden considerar micro-fibras y macrofibras.

Clasificación de las fibras para el hormigón

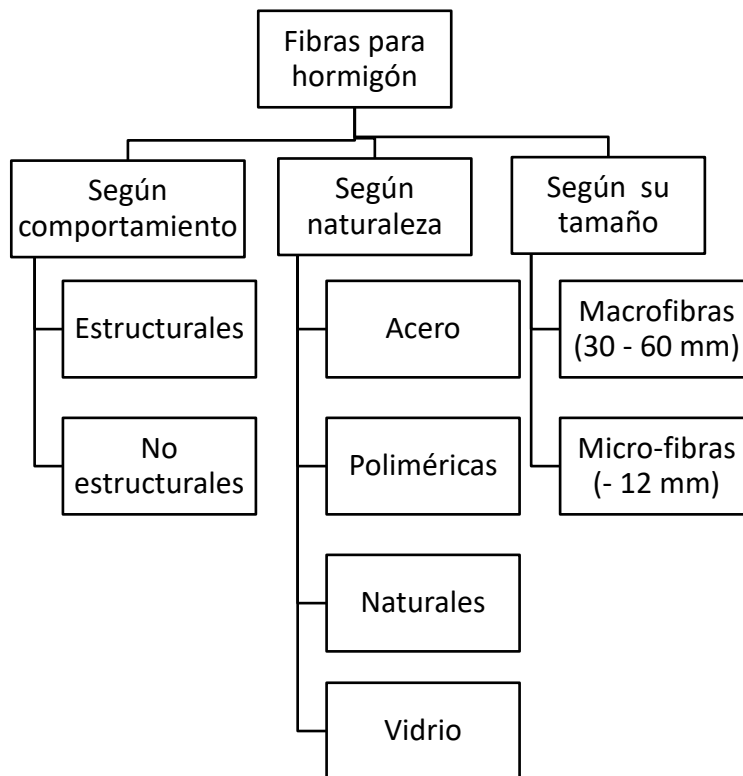


Figura 2 Clasificación de las fibras para el hormigón

2.2.1 Según su comportamiento

2.2.1.1 Estructurales

Las fibras serán consideradas estructurales si la contribución de las mismas puede ser considerada en el cálculo de la respuesta de la sección del hormigón. Las fibras serán no estructurales en caso contrario.

Para que las fibras sean consideradas estructurales deben aportar mejoras en el estado límite de servicio (ELS), reducir el ancho de grietas y durabilidad. Las estructuras deben presentar mejoras en el estado límite último (ELU), pudiéndose sustituir o reducir el refuerzo convencional. De acuerdo al Código Modelo (MC), se requieren dos condiciones para que el FRC sea considerado estructural (según ecuación 1 y 2):

$$\frac{f_{r1K}}{f_{LK}} > 0,4 \text{ y } \frac{f_{r3K}}{f_{r1K}} > 0,5; \quad \text{ecuación 1}$$

Donde;

f_{r1k} es la resistencia luego de haber ocurrido la fisura, correspondiente a un desplazamiento de abertura de fisura (CMOD) de 0,5mm, de acuerdo a la norma UNE-EN 14651.

f_{r3k} es la resistencia luego de haber ocurrido la fisura, correspondiente a un desplazamiento de abertura de fisura (CMOD) de 2,5 mm, de acuerdo a la norma UNE-EN 14651.

F_{Lk} es el límite de proporcionalidad elástica de acuerdo a la norma UNE-EN 14651.

$$\delta_U \geq 20\delta_{SLS} \text{ y } \delta_{peak} \geq 5\delta_{SLS} \quad \text{ecuación 2}$$

Donde,

δ_U es el desplazamiento último, δ_{peak} es el desplazamiento en la carga máxima, y δ_{SLS} es desplazamiento esperado en condiciones de servicio.

Tiene finalidad estructural cuando se utiliza su contribución en los cálculos relativos a alguno de los estados límite último o de servicio y su empleo puede implicar la sustitución parcial o total de armadura en algunas aplicaciones. (EHE, 2008).

Proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa. Su empleo puede aumentar la anchura de las bielas de compresión, lo cual puede ser tenido en cuenta en los

modelos de bielas y tirantes. Por consiguiente, la combinación de armadura convencional y fisuras puede suponer una alternativa para reducir la cuantía de armadura convencional en regiones D donde se presente una alta densidad de armadura que dificulte el correcto hormigonado del elemento.

2.2.1.2 No estructurales

Son aquellas que sin considerar el cálculo esta energía suponen una mejora ante determinadas propiedades como por ejemplo el control de la fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasivo, impacto y otros.

2.2.2 Según su tamaño

Las fibras, por su tamaño, se clasifican en macrofibras y micro-fibras. En los siguientes apartados se detallan las principales características para cada tipo, que aparecen en la Figura 3 .

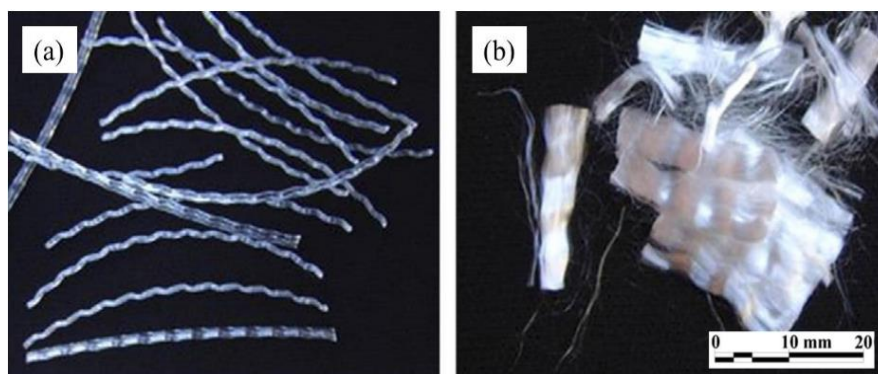


Figura 3 a) Macrofibras sintéticas, b) Microfibras sintéticas Autor (Alberti et al., 2020)

2.2.2.1 Macrofibras (30-60mm)

Aunque la norma establece para estas fibras dimensiones $>$ a 0.3 mm de diámetro y 30 mm de longitud, las macrofibras sintéticas comerciales suelen tener diámetros cercanos a 1 mm y longitud alrededor de los 40-50 mm. Ver Figura 3 (a) macrofibras sintéticas.

2.2.3.2 Microfibras (<12mm)

Estas fibras se caracterizan por tener una cantidad de fibras por kg aproximadamente 2×10^3 veces mayor que las macrofibras sintéticas. Ver Figura 3 b) sin embargo, carecen de carácter estructural.

Se suelen utilizar para disminuir la retracción del hormigón. El efecto que producen se basa en que retienen en la masa del hormigón tanto los sólidos, como el agua, de forma que evitan que gran parte del agua se eleve a la superficie libre del hormigón y se evapore rápidamente, dando lugar a la retracción y, en consecuencia, a la fisuración. (Carné García, 2016).

Aumentan la resistencia al fuego, al tener un gran número de fibras por kg, estas se distribuyen por toda la masa de hormigón, de forma que, a altas temperaturas, la fibra proporcionando una red capilar a través de la cual se evapora fácilmente el agua, evitando el estallido del hormigón en situaciones de altas temperaturas o incendios.

2.2.3 Según el material

Esencialmente, la naturaleza y el tipo de fibras determinan la efectividad de la acción reforzante y la eficacia de la transmisión. En la actualidad se utilizan diversos tipos de fibras. La Tabla 1 muestra algunos de los materiales más comunes empleados para fabricar fibras, con indicación de sus principales características.

Tabla 1 Propiedades de las fibras más utilizadas de acuerdo al ACI Committee 544, 2002

Tipo de fibra	Diámetro equivalente (mm)	Peso específico (kg/m³)	Resistencia (MPa).	Módulo elástico (GPa).	Elongación de rotura (%)
Acero	0,1500-1	7840	345-3000	200	4-10
Carbón	---	1400	4000	230-240	1,4-1.8
Polímero	0,020-1	900-1400	200-860	1,5-8,3	3-13
Acrílico	0,005-0,15	2500	1000-2600	70-80	1,5-3,5
Natural	0,025-0,40	1020-1500	65-700	0,9-40	11,2-25
Grafito	0,008-0,009	1900	1000-2600	230-415	0,5-1
Polipropileno	0,02-1	900-950	200-760	3,5-15	5-25
Aramida	0,01	1450	3500-3600	65-133	2,1-4

2.2.3.1 Fibras de acero

Estas fibras deberán ser conformes con la norma UNE 83501 y según el proceso de fabricación se clasifican en: trefiladas (tipo I), cortadas en láminas (tipo II), extraídas por rascado en caliente (virutas de acero) (tipo III) u otras (por ejemplo, fibras de acero fundidas) (tipo IV). La forma de la fibra tiene una incidencia importante en las características adherentes de la fibra con el hormigón y pueden ser muy variada, estas pueden ser rectas, onduladas, corrugadas, conformadas en extremos de distintas formas, etc.

De acuerdo a la norma UNE-EN 14889 las fibras de acero son elementos rectos y deformados de alambres de acero estirado en frío, recortes de fibras de acero rectas o deformadas, fibras extraídas fundidas, fibras estiradas en frío y fibras molidas de bloques de acero que son adecuados para su mezcla homogénea con hormigón o mortero. La longitud de la fibra, se recomienda sea, como mínimo 2 veces el tamaño del agregado mayor. Es usual el empleo de longitudes de 2,5 o 3 veces el tamaño máximo del agregado. Además, en los casos en que el hormigón vaya a ser bombeado, el diámetro de la tubería de bombeo exige que la longitud de la fibra sea inferior a $2/3$ del diámetro del tubo. Sin embargo, la longitud de la fibra debe ser suficiente para dar una adherencia necesaria a la matriz y evitar arrancamientos con demasiada facilidad. La Figura 4 representa algunos tipos de fibras de acero utilizados frecuentemente.

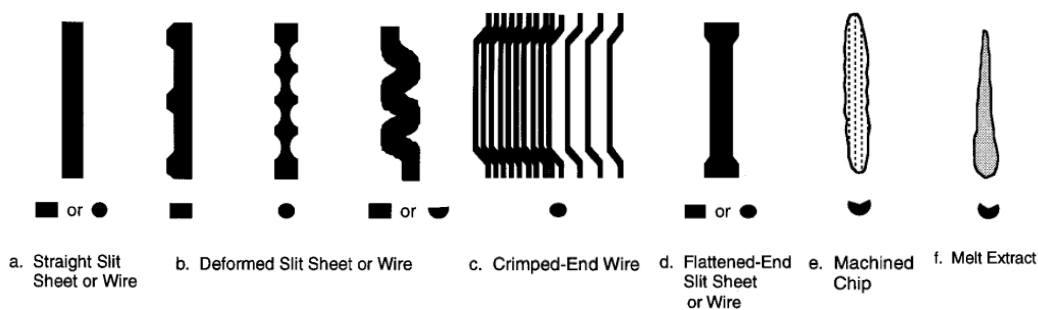


Figura 4 Varios tipos de fibras de acero. (ACI 544.1R-96)

Además, ha sido demostrado que las fibras en general, mejoran de manera considerable la respuesta del hormigón frente a problemas como la retracción (microfisuración). De la misma manera el hormigón reforzado con fibras de acero ofrece esta cualidad.

El módulo de elasticidad del acero es diez veces mayor que el del hormigón, su adherencia y deformación en rotura es bueno. Una propiedad que se ha comprobado muy influyente es la esbeltez (relación entre longitud y diámetro). Aunque estas fibras son susceptibles de oxidarse si se encuentran cerca de la superficie de la pieza, la experiencia indica que ello solo puede afectar a la estética, pero no a la resistencia. (Pineda, 2013). Dentro de las aplicaciones más frecuentes se destacan las siguientes: en pavimentos, túneles, elementos prefabricados, entre otros usos.

2.2.3.2 Poliméricas

Están formadas por un material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster) extruido y posteriormente cortado. Pueden ser adicionadas homogéneamente al hormigón, mortero o pasta. Se rigen por la norma UNE 83501 y, según el proceso de fabricación se clasifican en: monofilamentos extruido (Tipo I) y láminas fibriladas (Tipo II).

Las fibras poliméricas en forma de monofilamento extruido se producen en un proceso de extrusión en el que el material se estira en caliente a través de un troquel de sección transversal circular, generando una serie de filamentos continuos a la vez denominados estopa. (ACI 544, 2002). En cambio, las láminas fibriladas pueden ser de polietileno de alta densidad, polipropileno, acrílico, entre otros.

Su principal aplicación es el control de las fisuras por retracción. Este hecho restringió su uso a obras no estructurales durante años, pero las SNFRC se están aceptando gradualmente en el campo. Actualmente, el hormigón con macrofibras sintéticas se utiliza como refuerzo en túneles, refuerzos en soleras, pistas de aeropuertos, elementos prefabricados, entre otros usos.

2.2.3.3 Fibras naturales

Se pueden obtener muchos materiales que brinden refuerzos naturales a bajo coste y a un mínimo uso de energía, utilizando mano de obra disponible localmente y conocimientos técnicos. Las fibras naturales se utilizan en la fabricación de FRC con bajo contenido de

fibra y ocasionalmente se han utilizado en la fabricación de FRC con hojas delgadas a un alto contenido de fibras. (ACI 544, 2002).

Dentro de las fibras naturales más estudiadas en la actualidad, se destacan las siguientes: fibra de coco, fibra de sisal, fibras de caña de azúcar, fibras de bambú, entre otras fibras que poseen las características necesarias para ser utilizadas como refuerzo en el hormigón. El uso de fibra de coco (CF) tiene el beneficio de la mayor dureza entre las fibras naturales. La abundante disponibilidad y el bajo coste la hacen aptas para su uso en compuestos de hormigón. Por ejemplo, el espesor de las carreteras de hormigón se puede reducir con el uso de fibras naturales. (Khan et al., 2020).

2.2.3.4 Fibras de vidrio

La fibra de vidrio es el refuerzo más utilizado en la actualidad para fabricar materiales compuestos, sobre todo para aplicaciones industriales. Esto es debido a su gran disponibilidad y a sus buenas características mecánicas. Algunas de las propiedades de la fibra de vidrio son incombustibles, imputrescible, excelente aislante térmico, muy maleable, no produce gases tóxicos, estabilidad dimensional, compatible con materias orgánicas. (López, 2012).

El hormigón reforzado con fibra de vidrio es un material compuesto en el que se proyectan las fibras sobre un lecho de cemento en varias capas, creando finalmente un material que reúne las propiedades de ambos. Sus usos son muy variados: depósitos de líquidos, pavimentos, mobiliario urbano, elementos resistentes al fuego, reparaciones arquitectónicas, etc. El mezclado de la fibra de vidrio es diferente al de las otras fibras, como por ejemplo a las fibras de acero. Cuando hay que ejecutar capas delgadas por proyección, una madeja de fibras de vidrio ceba una pistola de aire comprimido que las corta, las baña con la lechada de cemento y las proyecta. Además, el montaje se lleva a cabo en seco, ya que las uniones se ejecutan sobre espumas de polietileno, y para el sellado de las juntas se utiliza silicona neutra o poliuretano. (López, 2012).

2.3 Hormigón reforzado con fibras metálicas y sintéticas

2.3.1 Hormigón reforzado con fibras metálicas (SFRC)

La principal ventaja de agregar fibras al hormigón o mortero es que generan una tensión una fuerza residual post-fisuración en combinación con una gran tensión de tracción. El material de hormigón reforzado con fibra de acero (SFRC) se caracteriza por tener una buena ductilidad y una tenacidad sustancial. (MC, 2010).

El hormigón reforzado con fibra de acero, es un hormigón hecho de cementos hidráulicos que contienen agregado fino, grueso y fibras de acero discontinuas y discretas. El SFRC falla sólo después de que la fibra de acero se rompa o falle la matriz del cemento. Las propiedades del SFRC tanto en estado fresco como en estado endurecido, incluida la durabilidad, son consecuencia de su propia naturaleza.

La mecánica de cómo el refuerzo con fibras refuerza el hormigón o el mortero y se extiende desde el estado elástico previo a la fisuración hasta el estado parcialmente plástico posterior a la fisuración, es un tema de investigación continuo. (ACI 544, 2002). Un enfoque de la mecánica de SFRC debe considerarlo un material compuesto cuyas propiedades pueden relacionarse con las propiedades de la fibra (porcentaje en volumen, resistencia y módulo elástico), las propiedades del hormigón (resistencia, porcentaje en volumen y módulo elástico), y las propiedades de la interfaz entre la fibra y la matriz. Un enfoque más general y actual de la mecánica del refuerzo de fibra asume una fisura mecanismo de detención basada en la mecánica de la fractura.

Algunos resultados publicados sobre hormigón reforzado con fibra de acero (SFRC) muestran que, incluso para niveles de carga altos ($F_a/F_w \sim 60\%$), los coeficientes de fluencia medidos siguen siendo pequeños (< 1) después de 90 días de carga sostenida. Para relaciones de carga más altas, se encontraron respuestas con fluencia terciaria y otros factores, como la delgadez de las fibras de acero, tienen un efecto sinérgico importante. (Plizzari & Serna, 2019).

Para una determinada fracción de volumen de fibra, la consistencia del hormigón en general se ve más afectada por las fibras de acero que las macrofibras sintéticas, por el contrario, para una tenacidad a la flexión, las fibras de acero influyeron en la consistencia del hormigón menor en comparación con las fibras de polipropileno. Mientras que se obtuvo el resultado opuesto considerando la tenacidad del hormigón reforzado con fibras. Es decir, las fibras de acero poseen mejor consistencia que las sintéticas. (Guerini et al., 2018). La Tabla 2 muestra los ensayos más frecuentes realizados al hormigón reforzado con fibras.

Tabla 2 Algunas pruebas realizadas al hormigón reforzado con fibras

Tipo de Test	Estándar	Descripción del Test
Ensayo de asentamiento	UNE-EN 12350	Ensayos de hormigón fresco. Ensayo de asentamiento.
Rotura a compresión	UNE-EN 83507	Hormigones con fibras, rotura por compresión.
Contenido de aire	UNE-EN 12350	Ensayo de hormigón fresco. Contenido de aire. Métodos de presión.
Resistencia Residual	RILEM TC 162-TDF	Recomendaciones de RILEM TC 162 TDF para determinar la resistencia residual.
Sección cuadrada	UNE-EN 14488	Ensayo de hormigón proyectado, determina la capacidad de absorción de energía de probetas planas reforzadas con fibra.
Viga de tres puntos	UNE EN 14651	Ensayo para el hormigón con fibras metálicas. Resistencia a tracción por flexión, resistencia residual.
Viga de cuatro puntos	NBN-B15-238	Norma belga para determinar la flexión en vigas, resistencia máxima, resistencia residual y tenacidad.
Carga aplicada a los tres tercios del claro	ASTM C1609	Norma americana para determinar la flexión en vigas, resistencia máxima, resistencia residual y tenacidad.

La norma UNE-EN 14651 es una norma europea basada en un método para determinar la resistencia a la tracción por flexión, el límite de proporcionalidad elástica (F_{LOP}) y un conjunto de valores de resistencias residuales proveniente del hormigón con fibras metálicas. Esta norma también puede ser utilizada para el uso de combinaciones de fibras metálicas con otras fibras, mide abertura de fisuras desde un CMOD desde 0,5mm hasta 3,5mm y se rechaza cualquier viga cuyas fisuras se formen fuera de la entalla.

En cambio, la ASTM C1609 norma americana permite obtener la curva de carga contra deflexión neta de una viga hasta que se alcance la deflexión de 1/150 veces la longitud que existe entre los puntos de apoyo. La tasa de incremento de la deflexión es dependiente del valor de deflexión medido. Es un ensayo de tipo flexión en cuatro puntos, se aplica la carga desde dos puntos y esto implica que entre ellos se genere una región de flexión pura en la viga. (Paegle & Fischer, 2014).

Al emplear la norma ASTM C1609 se ha verificado que ocurre una falla súbita de las probetas con bajo contenido de fibras, no siendo posible en algunas ocasiones obtener una visión clara del comportamiento residual, en cambio, la norma UNE-EN 14651 permite estudiar el comportamiento de las probetas luego del hormigón superar su módulo elástico y entrar en proceso de fisuración para muestras con alto o bajo contenido de fibras. Este comportamiento adecuado de las probetas ensayadas bajo la norma UNE-EN 14651 podría ser debido a la aplicación controlada de una carga puntual en el centro de vano y la realización de una entalla en la misma posición.

Estas normas podrían arrojar resultados diferentes debido al nivel de incertidumbre de los ensayos, el aceptar o no la diferencia entre las normas es una apreciación subjetiva del interesado en los resultados del ensayo.

2.3.2 Hormigón reforzado con fibras sintéticas (SNFRC)

El uso de macrofibras sintéticas en el hormigón ha recibido una gran atención, esto debido a la efectividad frente a ataques químicos y sus grandes propiedades mecánicas. En cambio, el uso de fibras de acero tiene un buen comportamiento en las estructuras de hormigón referente a resistencia y propiedades mecánicas, pero las mismas pueden presentar problemas de corrosión en ambientes marinos, incremento del peso de las estructuras y un

alto costo en comparación con las fibras de polipropileno. (Pakravan & Ozbakkaloglu, 2019). La Tabla 3 muestra una comparación de propiedades de algunas fibras.

Tabla 3 Comparación de propiedades de algunas fibras

Tipo de Fibra	Gravedad específica (kg/m ³)	Módulo elástico (GPa)	Fuerza de tensión (MPa)	Elongación última (%)	Ácido/Álkali resistencia	Costo aprox .** (\$/kg)
Polipropileno (PP)	910	1,5-12	240-900	15-80	Alta	1-2,50
Polietileno (PE)	920-960	5-100	80-600	4-100	Alta	2-20
Poliviny Alcohol (PVA)	1290-1300	20-42,80	1000-1600	6-7	Alta	1-15
Acero (ST)	7840	200	500-2000	0,5-3,5	Bajo- Alto*	1-8

* Depende de la presencia o ausencia de recubrimiento superficial.

** Precio basado en USD dólares por kilogramo

Las macrofibras en el SNFRC poseen un moderado módulo de elasticidad, alta resistencia a tracción, poco peso, entre otros beneficios. Ahora bien, su principal aplicación es en el control de fisuración en hormigones y morteros. Otro de sus usos más comunes es para reforzar hormigones frente a acciones de impactos. (Álvarez, 2017). Existen firmas de cementeras y empresas dedicadas al desarrollo tecnológico del hormigón y siguen trabajando en nuevas dosificaciones, tipos de fibras y aditivos que pueden modificar sustancialmente tanto la resistencia de estos hormigones, como su consistencia y durabilidad. (Sánchez, 2012).

El comportamiento frágil y la poca resistencia a la tracción del hormigón pueden considerarse como la principal desventaja del uso del hormigón en aplicaciones estructurales. Una buena dosificación de macrofibras sintéticas en el hormigón puede ser adecuada para aplicaciones estructurales, representa ductilidad a la compresión y gran capacidad de absorción de energía en tracción. (Rambo et al., 2018). La inclusión de fibras distribuidas aleatoriamente dentro de la matriz de hormigón para hacer hormigón reforzado con fibra se ha implementado como una solución para aumentar la resistencia a la tracción, la resistencia a la flexión y la ductilidad del hormigón desde la década de 1970. (E.R.K. Chandrathilaka, et al, 2020). Los hormigones reforzados con macrofibras sintéticas de alta resistencia presentan un alto rendimiento como refuerzo a los hormigones. Sin embargo, la aplicación de fibras de polipropileno de bajo módulo sigue creciendo debido a su notable

efecto en la mejora de la ductilidad del hormigón como parte de fibras mixtas, híbridas con otros tipos de fibras de alto módulo como las fibras de acero. (Pakravan & Ozbakkaloglu, 2019)

Dentro de las principales ventajas del SNFRC, podemos mencionar las siguientes: - resistencia al agrietamiento causado por la contracción por secado; reducción de la permeabilidad; resistencia al desconchado del hormigón expuesto a altas temperaturas; y mejoras en la resistencia al congelamiento y descongelamiento. (Pakravan & Ozbakkaloglu, 2019). La Tabla 4 muestra algunas compañías que suministran SNFRC. Un refuerzo compuesto de hormigón reforzado con macrofibras sintéticas es adecuado para aplicaciones estructurales, ofrece no solo una buena ductilidad bajo compresión y flexotracción, sino una elevada capacidad de absorción de energía bajo tensión. A diferencia de otros compuestos reforzados con fibra (p. Ej., Hormigones reforzados con fibra de acero), el comportamiento mecánico de un SFRC depende en gran medida de la unión por fricción establecida entre la fibra. (Rambo et al., 2018). Por otro lado, la introducción de macrofibras sintéticas puede generar un impacto negativo en la consistencia del hormigón, cuya pérdida está influenciada por diferentes parámetros (entre los que se encuentran el contenido y el tipo de fibra). (Guerini et al., 2018).

Tabla 4 Algunas compañías que suministran SNFRC

Compañía	Función	Localidad
ABC Polymer Industries, LLC	Fabricación de fibras sintéticas	USA
BASF Corporation	Fábrica y comercialización de productos químicos de la construcción	Todo el mundo
Durafiber, Inc.	Distribución de fibras plásticas	Norte América
Euclid Chemical	Proveedor de productos químicos y materiales de edificación	Todo el mundo
Elasto Plastic Concrete	Suplidor de fibras sintéticas estructurales para refuerzo	Todo el mundo
Fabpro Polymers	Desarrollador y fabricación de fibras plásticas	Todo el mundo
FORTA Corporation	Fabricación de fibras sintéticas	Todo el mundo
Grace Construction Products	Proveedor de productos químicos y materiales para la construcción	Global
Monahan FiberWorx	Fabricación y líder innovador en fibras sintéticas	USA
Propex Global	Líder desarrollador en soluciones innovadoras	USA
Sika Corporation	Suplidor de productos químicos y materiales industriales	Todo el mundo
Solomon Colors, Inc.	Pigmentos decorativos para el concreto, celulosa y micro fibras	USA

2.4 Incorporación de las fibras en los códigos

En el MC2010 para estructuras de hormigón, el hormigón reforzado con fibra (FRC) se reconoce como un nuevo material para estructuras. Las SNFRC están fuera del alcance en su campo de aplicación aunque se han realizado esfuerzo para su incorporación en los códigos. Esta introducción favorece las aplicaciones estructurales porque la necesidad de adoptar nuevos conceptos de diseño y la falta de códigos de construcción internacionales han limitado significativamente su uso hasta ahora. En el código se ha dedicado un esfuerzo considerable a introducir una clasificación de materiales para estandarizar la producción basada en el rendimiento y estimular un mercado abierto para todo tipo de fibras. (Di Prisco et al., 2013). La Figura 5 representa las diferentes respuestas estructurales fabricadas con FRC bajo tracción uniaxial o carga a flexión.

Con la finalidad de tener un mejor conocimiento respecto al FRC y el creciente desarrollo a nivel mundial del diseño estructural, el fib Special Activity Group 5 (SAG 5) por sus siglas

en inglés, preparó un fib Model Code y decidió introducir algunas secciones sobre nuevos materiales en particular el diseño de estructuras FRC.

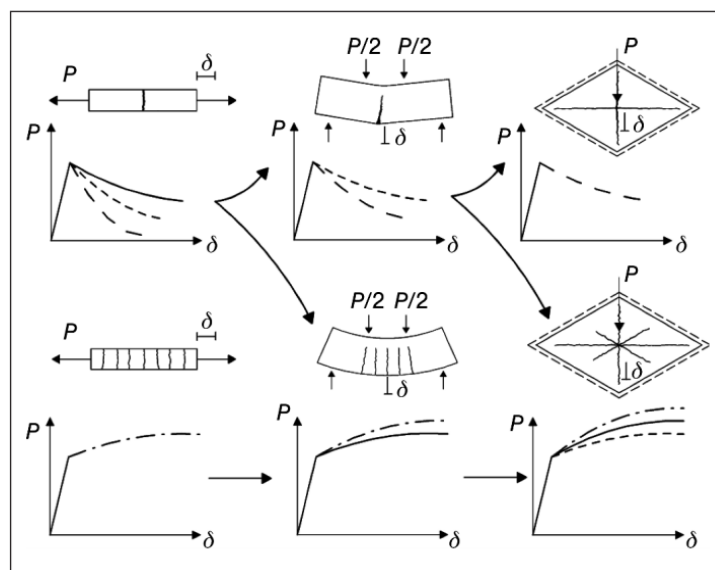


Figura 5 Diferentes respuestas estructurales con FRC. (fib. MC2010)

Los Grupos de Trabajo de fib TG 8.3 (Hormigón reforzado con fibra) y TG 8.6 (Hormigón de ultra altas prestaciones reforzado con fibras), prepararon estas secciones del fib Model Code 2010 sobre las reglas de diseño de FRC para proporcionar orientación a ingenieros en el diseño adecuado y seguro de elementos estructurales basados en FRC, tanto en estado de servicio como en estado límite último, utilizando el conocimiento más avanzado en diseño estructural. (Di Prisco et al., 2013).

El ACI Committee 544.1R-96 sobre hormigón reforzado con fibras (FRC), presenta una revisión exhaustiva de todos los tipos de fibras en el hormigón; incluye los principios fundamentales del hormigón reforzado con fibras.

La EHE-08, en su anejo 14 establece algunas recomendaciones para la utilización de hormigón reforzado con fibras. Los define como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. Enfatiza que los hormigones reforzados con fibras pueden ser con finalidad estructural o no estructural.

Las normas UNE-EN 14651 que especifica los métodos de ensayo para el hormigón con fibras metálicas, la determinación de la resistencia por flexión (límite de proporcionalidad

(F_{LOP}), resistencia residual) y UNE-EN 14889 que trata sobre los requisitos de las fibras poliméricas para su uso estructural o no estructural en hormigones, morteros y pastas. Esta última norma considera que el uso estructural de las fibras se produce cuando la adición de fibras se diseña para contribuir a la capacidad portante de carga de un elemento de hormigón.

La Normativa española UNE-EN 14889 contempla estas fibras y se plantea los requisitos que deben cumplir, así como la evaluación de la conformidad. Existen fibras de alto límite elástico (Fibras de Carbono, Aramida, etc.) la cual no se abordará en esta investigación.

2.5 Aplicaciones y Requisitos

Para un uso estructural del FRC, se debe garantizar un rendimiento mecánico mínimo. Las fibras se pueden utilizar para mejorar el comportamiento en ELS ya que pueden reducir el largo y el ancho de las fisuras, mejorando así la durabilidad. De igual forma se utilizar para mejorar el comportamiento en ELU donde pueden sustituir parcial o totalmente el refuerzo utilizado convencionalmente. Dependiendo de su composición, el FRC puede mostrar un comportamiento de endurecimiento o ablandamiento bajo tracción uniaxial. (MC, 2010).

La aplicación de una dosis moderada de fibras en el hormigón no cambia nada en la matriz cementosa antes de la fisuración y no se esperan cambios en el comportamiento de fluencia con respecto al hormigón ordinario, ni a compresión ni en tracción.(Plizzari & Serna, 2019). En cambio, de acuerdo a (Ding et al., 2011) las fibras pueden reducir la tensión del acero longitudinal y los estribos en tensión máxima, aumentan tanto la capacidad de tracción del hormigón como la absorción parcial de tracción del refuerzo de acero.

Dentro de sus aplicaciones a nivel general podemos mencionar las siguientes:

- Construcción de paneles más finos;
- Es una alternativa resistente y económica en el hormigonado de elementos situados en cubiertas, suelos, sótanos o unidades de obra sometidas a la acción de agentes externos agresivos, como por ejemplo el fuego.
- Las fibras en el hormigón son adecuadas para la utilización en pavimentos y naves de fabricación o almacenamiento, rampas de acero, plazas de aparcamiento, capas de restauración sobre suelos de hormigón, entre otras aplicaciones.

La corrosión en las fibras de acero podría producir el efecto de desconchamiento, así como una reducción en el área de sección de las fibras, lo que podría comprometer significativamente la durabilidad de la estructura.(Granju & Balouch, 2005).

Efectos de refuerzo de la fibra en elementos estructurales podrían verse afectados por el comportamiento a largo plazo de FRC relacionado con el envejecimiento de la fibra y el comportamiento de fluencia. El primero puede no ser aceptado en elementos estructurales cuando no se garantiza la seguridad durante toda la vida útil de la estructura. (Plizzari & Serna, 2019). Aunque existen varios beneficios del uso de fibras en el hormigón de igual forma se puede ver afectada la consistencia, la compactibilidad, movilidad y estabilidad. Esto debido a su alta área de superficie específica; las fibras aumentan la demanda de agua y, por lo tanto, pueden afectar la mezcla, colocación y compactación del concreto. Además, puede haber desafíos en la dispersión, donde las fibras se enredan y dan como resultado una distribución no uniforme en la matriz de hormigón. Un FRC que no se puede colocar y compactar fácilmente afectará la capacidad de construcción y no dará lugar a las características de resistencia o durabilidad requeridas del material y en consecuencia de la estructura general.(Guerini et al., 2018)

2.6 Durabilidad del hormigón reforzado con fibras frente a temperaturas moderadas

Existe poca información respecto a la durabilidad del hormigón reforzados con macrofibras sintéticas y de acero. Sin embargo, de acuerdo a un estudio realizado por la (ASDFIL, 2019) el cual consistió en el envejecimiento de fibras sintéticas durante 25 años para determinar la variación de su resistencia y módulo de elasticidad, se observó que la resistencia a tracción de las fibras disminuyó en un 12%, sin embargo, el modulo se mantuvo sin cambios, de hecho aumentó en un 4,5% después de haber envejecido durante 50 años, la resistencia a tracción se redujo a un 20% de la resistencia inicial. Se puede explicar este hecho debido a que el módulo depende de la resistencia a tracción y el alargamiento del tipo de fibra. La resistencia a tracción se ve reducida debido a la degradación de las cadenas de polímeros y esto causa un efecto negativo sobre su módulo.

La durabilidad del SFRC puede verse afectada por la carbonatación y la corrosión inducida por cloruros; en cambio, para el SNFRC existe una preocupación, específicamente las

expuestas a condiciones de intemperie (ya sea por agrietamiento o deterioro parcial del hormigón), la capacidad de sus componentes de conservar sus propiedades originales, la resistencia a ciclos hielo-deshielo y la resistencia a la temperatura (fuegos, heladas, etc.) pueden verse reducida. (Kurtz & Balaguru, 2000).

Las macrofibras sintéticas se consideran una buena opción para aumentar la durabilidad del SNFRC, aunque existen diversos factores que pueden comprometer sus características mecánicas como los efectos de la temperatura. Este es uno de los aspectos más importantes de este trabajo, determinar cuál es el desempeño que posee el SNFRC frente a los efectos de las temperaturas moderadas.

2.7 Degradación de fibras de polipropileno

El polipropileno se degrada principalmente por oxidación, lo cual es una reacción entre el polímero y el oxígeno molecular. El resultado molecular de la reacción es la rotura de las cadenas de polímeros, lo que finalmente conduce a una pérdida de resistencia y a un aumento del número de grupos funcionales reactivos. (Durus, 2018).

Las fibras de polipropileno son bastante resistentes a agentes químicos como ácidos, álcalis y sales. Sin embargo, todos los polímeros naturales y sintéticos están sujetos a deterioro por exposición al medio ambiente, como resultado de cambios irreversibles a su composición y estructura de las moléculas de polímero. (N. Sagre, E. Tonella, 1998). En la Figura 6 se muestra un esquema del proceso de degradación del polipropileno.

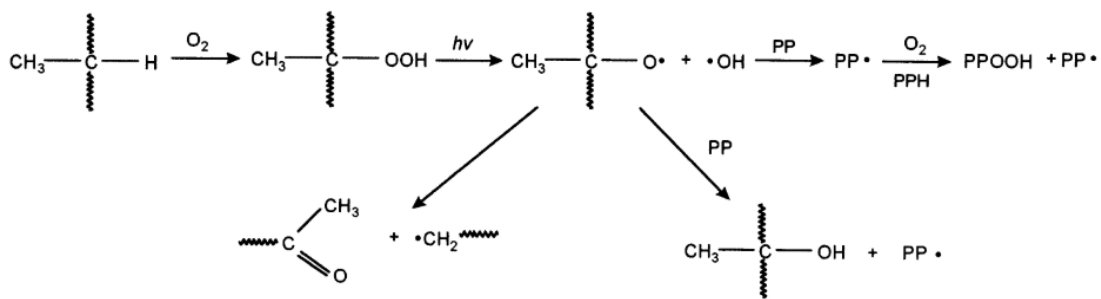


Figura 6 Esquema del proceso de degradación del polipropileno (N. Sagre, E. Tonella, 1998)

Una degradación foto-oxidativa de las fibras de polipropileno en la matriz del hormigón no siempre se da. Sin embargo, en presencia de ambientes agresivos y tiempos de exposición prolongados, los procesos termo-oxidantes pueden tener una velocidad significativa incluso a temperatura ambiente.

La oxidación del polipropileno es una reacción en cadena cuya iniciación requiere una fuente de energía para la generación de radicales que inicia la reacción. La fuente de energía es más comúnmente energía térmica, representada por la temperatura del material, pero también puede ser proporcionada por luz ultravioleta u otra radiación de alta energía.

2.8 Influencia de la temperatura en las estructuras de hormigón reforzadas macrofibras sintéticas.

Existen variaciones de temperatura en todo el mundo, en algunos países la temperatura varía enormemente durante las cuatro estaciones del año. Además, existen ciertas construcciones que pueden estar sometidas a temperaturas moderadas debido a su uso. Por lo tanto, es crucial predecir de manera efectiva el comportamiento térmico de los materiales de construcción para diseñar adecuadamente estructuras que sean capaces de soportar variaciones tan extremas de temperatura. La Tabla 5 muestra algunos estudios recientes realizados acerca del FRC.

Tabla 5 Resumen de las diferentes literaturas existentes acerca del hormigón reforzado con fibras a diferentes temperaturas.

Autor	Año	Tipo de fibra	Contenido de fibra (kg/m ³)	Temperatura (°C)	Detalle del espécimen (mm)	Descripción del Test
Hernan Xargay	2018	PP	7% - 8% del peso del cemento	20°C, 300°C y 600°C	Muestras cilíndricas y rectangulares	Test de compresión, splitting, test de tensión y método de los tres puntos en la viga.
Deepak Kakade	2017	Steel	0,5 – 4% peso del cemento	20,100, 200, 300,400 y 500 °C.	Vigas de 150x150x550mm	Se realizaron ensayos a tensión y compresión de los especímenes.
N. Buratti, C. Mazzotti	2015	Macrosynthetic	3%-7% del peso del cemento.	20-50	Muestras prismáticas de 150x150x550 mm	Método de los tres puntos en la viga en diferentes temperaturas, de acuerdo a un protocolo controlado durante de 3,5 meses.
Gu and Ozbakka loglu	2016	Fibras Macrosintéticas	---	-----	---	Estudio de las macrofibras sintéticas.
Ahmet Cavdar	2011	Polymeric Fibers	0,0%, 0,3%, 0,6%, 0,9% y 1,2% del peso del cemento.	21°C, 100 °C,450 °C,650 °C,850 °C.	----	Basado en la norma EN 196

Hoy en día no existen muchos estudios referentes al comportamiento de las estructuras de hormigón reforzadas con macrofibras sintéticas sometidas a diferentes temperaturas. Se pueden analizar algunos artículos encontradas, como es el caso de N. Buratti y C. Mazzotti, en su artículo (Experimental test of the effect of temperature on the long-term behavior of macrosynthetic fiber reinforced concrete), donde estos definen una campaña experimental con temperaturas desde 20° hasta 50° y determinan su comportamiento tanto a corto y largo plazo de los elementos estructurales. Dentro de los resultados obtenidos se puede decir que incluso en pequeñas variaciones de la temperatura podemos tener deformaciones a largo plazo en gran medida y en algunos casos conducir hasta fallas por fluencia terciaria de los elementos estructurales. (Buratti & Mazzotti, 2015).

Buratti y Mazzotti determinaron que mediante las pruebas de flexión a las que fueron sometidas varias probetas de hormigón a corto plazo a temperaturas entre 20° C y 40°C,

arrojaron que no tuvo un efecto significativo en dos de los especímenes, sin embargo en el resto de las pruebas ocurrieron reducciones de hasta 20% de la resistencia flexotracción.

Cuando la temperatura en las estructuras de hormigón alcanza entre 160-170 °C se produce una incompatibilidad térmica, es decir, en los agregados se crean tensiones entre ellos y la pasta de cemento se contrae. Esta tensión inducida da como resultado la ruptura de la unión interfacial entre el agregado y la pasta de cemento circundante, lo que además da como resultado la pérdida de la resistencia de las partículas de concreto. (Çavdar, 2013).

La temperatura en elementos estructurales compuestos de fibras sintéticas en periodos cortos ha sido analizada con métodos como ensayos a flexión a tres puntos aplicados en un espécimen a temperaturas de (20°C - 40°C), arrojando que la temperatura en pequeños lapsos de tiempo produce una reducción de la resistencia residual al concreto reforzado con microfibras sintéticas. También tuvo un fuerte efecto sobre las deformaciones a largo plazo produciendo en algunos casos, falla por fluencia. Estos hallazgos sugieren que la temperatura siempre debe considerarse como un factor importante al diseñar elementos con fibras sintéticas. (Buratti & Mazzotti, 2015).

Un aumento de temperatura en el hormigón provoca deterioro, ya que cambia la matriz del cemento. Por lo tanto, cuando las fibras se agreguen a la pasta de hormigón, dado que las fibras tienen una estructura más dúctil en comparación con la matriz del cemento y los agregados, esto provoca discontinuidad en la matriz del cemento, por lo tanto se espera que este evento disminuya la resistencia a compresión. (Çavdar, 2013).

Hallazgos recientes han demostrado la efectividad de la adición de fibra sobre la mejora de la estabilidad térmica de los materiales de hormigón. La incorporación de fibras conduce a una mejora de las propiedades residuales de la mezcla de hormigón después de la exposición a temperaturas elevadas. La fusión de las fibras de PP a altas temperaturas (punto de fusión = 160-170°C) crea una vía para el vapor de agua y libera la presión de vapor que reduce significativamente la tendencia al efecto del spalling o desconchamiento del hormigón armado. (Pakravan & Ozbakkaloglu, 2019).

La Figura 7 muestra una comparación a roturas de probetas a compresión con 0% de contenido de macrofibras sintéticas y 0.5%, donde se observa que los especímenes que

contienen fibras de polipropileno poseen un comportamiento más dúctil que las que carecen de las fibras. Este acontecimiento ocurre debido a que las fibras de polipropileno se funden a altas temperaturas y crean redes para liberar las presiones inducidas térmicamente, y en consecuencia evitan una pérdida excesiva de su resistencia. (Mohammadhosseini & Yatim, 2017).

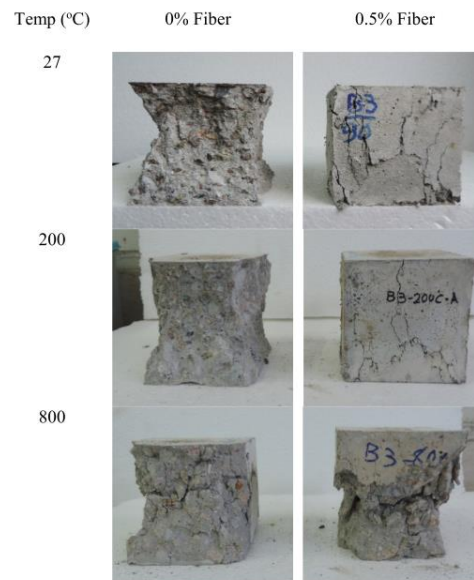


Figura 7 Comportamiento de probetas de concreto sometidos a diferentes temperaturas. (Mohammadhosseini & Yatim, 2017)

El comportamiento del SNFRC sometido a altas temperaturas reduce gradualmente su resistencia a la tracción. Las temperaturas entre 400°C y 570°C son muy críticas para el rendimiento mecánico de las fibras de polipropileno, en ese sentido se pierde parte de la cristalinidad en su comportamiento post-fisuración. (Rambo et al., 2018).

Recientemente el trabajos de (Caballero-Jorna et al., 2021) donde se sometieron probetas de hormigón reforzadas con macrofibras poliméricas y de acero a temperaturas de -5°, 20°C y °50°C en estado pre-fisurado y no pre-fisurado a ensayos de flexotracción mediante la norma UNE-EN 19651; se verifica que las muestras no sufrieron degradación notable a las temperaturas de estudio después de haber estado 60 días a exposición, por lo tanto, las SNFRC tienen potencial para usarse a temperaturas moderadas.

CAPÍTULO III- PROGRAMA EXPERIMENTAL

Introducción

Este capítulo tiene como finalidad describir el programa experimental que se ha realizado para lograr los objetivos específicos descritos en el capítulo I. Se detallan los mecanismos utilizados de acuerdo a las normas con la finalidad de obtener resultados fiables.

3.1 Programa Experimental

Se eligieron estas temperaturas de (-15°C, 20°C y 60 °C) debido a que son temperaturas comunes en muchos países a los que se ve sometido el hormigón tradicional y el hormigón reforzado con macrofibras. En algunos lugares del mundo se han registrado temperaturas de 54,4°C, como es el caso del Valle de la Muerte en (California), temperatura más alta de la que se tiene conocimiento en los últimos 80 años (United Nations, 2020). Por otro lado, existen países como China, India, Mongolia o Kazajstán en Asia, entre otros dónde las temperaturas han llegado alcanzar los -50°C.

Debido a la poca información y brecha científica que existe sobre los efectos que generan estas altas y bajas temperaturas en las estructuras de hormigón reforzado con macrofibras se decide estudiar cual es el comportamiento mecánico que presenta el hormigón reforzado con macrofibras bajo estas condiciones de dadas.

Los ensayos que se llevaran a cabo, estarán guiados bajo la norma UNE-EN 14651. Se determinaran parámetros como: límite de proporcionalidad elástico (F_{LOP}) y sus resistencias residuales más comunes (fr_1 y fr_3), debido a que son parámetros de importancia en elementos de hormigón tanto para el diseño, durabilidad, ductilidad y otros aspectos de las estructuras.

En este capítulo se describe el programa experimental de laboratorio. Se parte de una dosificación de hormigón reforzado con macrofibras sintéticas y de acero, se realizará una campaña experimental compuesta de 4 series prevista de 30 probetas prismáticas para los ensayos de flexotracción sometidos a temperaturas de estudio y 9 probetas cubicas por amasada para los ensayos a compresión. Ver Figura 8, dónde se establece la estructura de los procesos a realizar. Este programa experimental tiene como finalidad imitar las condiciones de temperatura antes mencionadas, de manera tal que los resultados sean lo

más representativos posible. Analizaremos las características que presenta el hormigón reforzado con macrofibras en estado fresco y endurecido.

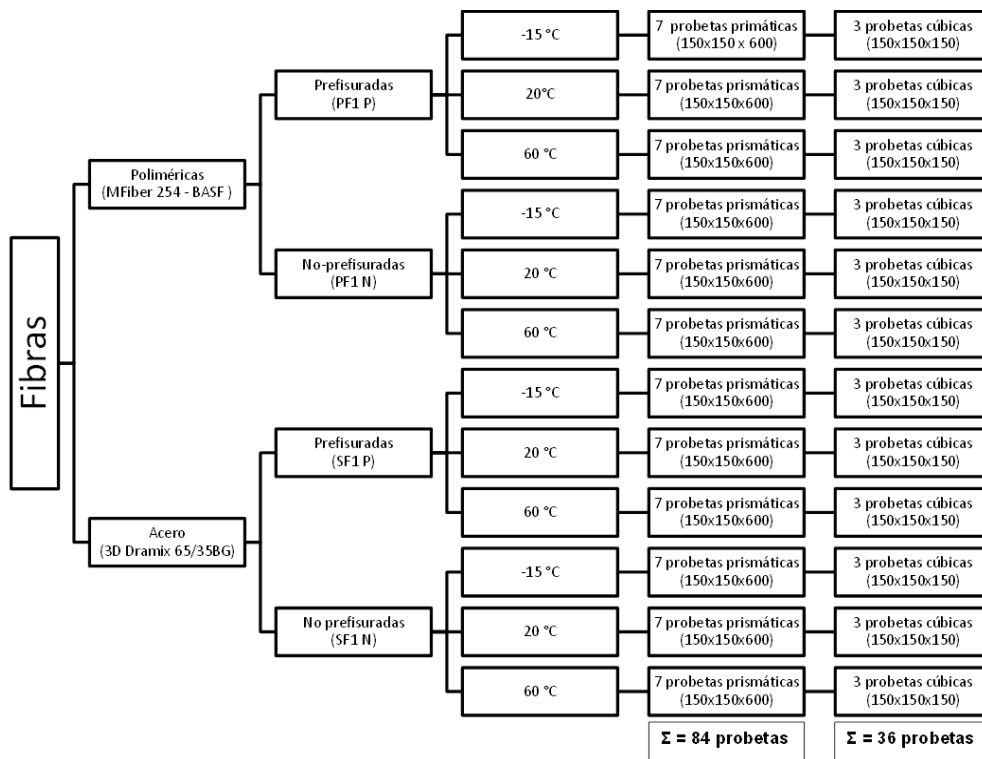


Figura 8 Programa experimental que se llevara a cabo durante los ensayos.

3.2 Materiales

3.2.1 Cemento

El cemento utilizado en nuestra investigación es CEM I 42,5 R-SR5 contiene silicatos cálcicos, destinado para ser empleados en hormigones armados o pretensados, así como hormigones de alta resistencia, tanto iniciales como finales. Ideal para la fabricación de hormigón resistente a los sulfatos. La norma UNE-EN 197-1 indica que los componentes principales y minoritarios en masa deben de ser Clinker (95-100%) y componentes minoritarios (0-5%).

De acuerdo al (ACI Committe 544., 2002), el hormigón reforzado con macrofibras poliméricas debe de contener 280-600 kg/m³ de cemento, en este caso utilizamos 325 kg/m³.

La resistencia a compresión del cemento utilizado es de 42,5 MPa, lo que significa que la resistencia inicial a los dos días debe ser mayor o igual a los 20 MPa y pasados los 28 días debe alcanzar los 42,5 MPa, el tiempo a inicio de fraguado debe ser mayor a los 45 minutos y la expansión de su volumen menor de 10mm.

3.2.2 Agua

El agua es un agente activo en la hidratación del binder. De acuerdo a la (Comisión Permanente del Hormigón, 2008), la cantidad de agua añadir en la amasada para conseguir la consistencia especificada, dependerá de la cantidad de agua aportada por los agregados y de la capacidad de retención de las distintas fracciones de estos. Por lo tanto, es de importancia fundamental conocer el agua superficial que aportan los agregados, especialmente la arena. En cuando al agua de absorción y a la capacidad de retención, estas se deben determinar en cada fracción granulométricamente mediante ensayos previos. De acuerdo a la norma UNE 83952 debe poseer un pH ≥ 5 y una cantidad de sustancias disueltas ≤ 15 gramos por litro.

Referente a la campaña experimental, el agua utilizada ha sido agua de grifo. El tipo de agua usada puede llevar a resultados diferentes según su composición química ya que es un componente esencial para la reacción. Es por ello que se ha considerado más práctico y de utilidad el uso de agua de las fuentes habituales en lugar de agua destilada.

3.2.3 Agregados

La característica de los agregados debe permitir alcanzar la adecuada resistencia y durabilidad del hormigón que con ellos se fabrica, así como cualquier otra exigencia que se requiera, el tamaño máximo de agregado (TMA) es de 20mm. Los agregados utilizados en nuestra investigación son los siguientes: grava 16/20 mm, grava 8/16 mm, grava 4/8 mm, arena roja y arena blanca. Estos agregados fueron seleccionados de manera tal que representen los hormigones que se utilizan en la actualidad. La Figura 9 muestra los agregados y los diámetros utilizados en la amasada.



Figura 9 Agregados utilizados en las amasadas.

Los ensayos para determinar la densidad de los agregados se realizaron bajo la norma UNE-EN 1097, la Figura 10 a) y b) muestran las herramientas empleadas para aplicar esta norma, se utilizó la metodología del picnómetro, para usar este método se debe tener en cuenta el tamaño de las partículas, el cual debe estar comprendido entre 4mm y 0,063mm.

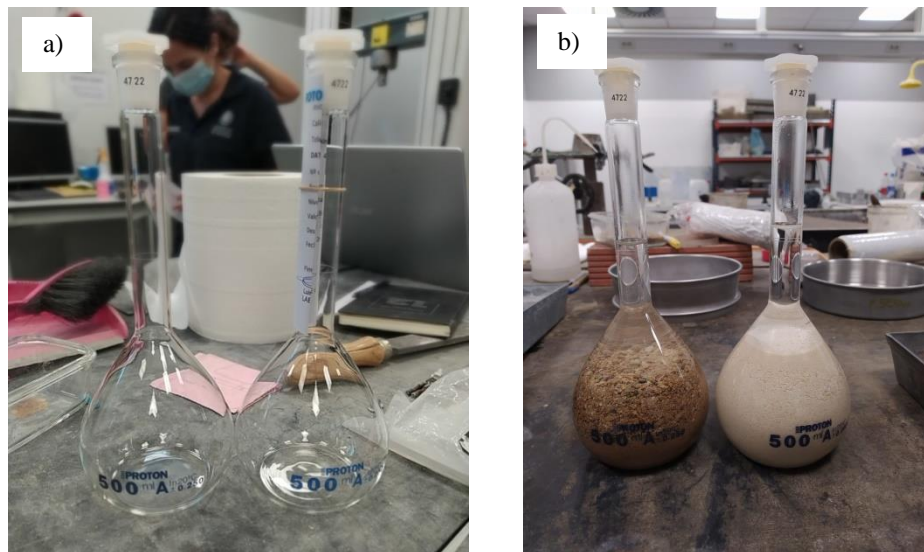


Figura 10 a) Picnómetros para determinar la densidad, b) Picnómetros con agregados.

Para realizar estos ensayos la toma de muestra se debe realizar de conformidad con la norma europea UNE-EN 932, de igual manera la reducción de muestras se deberá realizar bajo la misma norma. La masa de la muestra de ensayo de agregados deberá ser igual o superior a 1 kg.

3.2.4 Superplastificante

El aditivo utilizado es el Sika® ViscoCrete®-5970, empleado para hormigones con baja relación a/c sin pérdida de propiedades como: bombeabilidad, fluidez y plasticidad. La introducción de este aditivo en la fabricación del hormigón incrementa las resistencias iniciales y finales del mismo. Proporciona alta durabilidad e impermeabilidad en hormigones. De acuerdo a la compañía Sika® la dosificación recomendada esta entre el 0,5 y el 2% del peso del cemento. En las amasadas realizadas se utilizó un 0,5 % del peso del cemento debido a las características del hormigón fabricado.

3.2.5 Fibras

Las macrofibras sintéticas aplicadas al hormigón, mejoran en gran medida su resistencia a flexión en elementos estructurales, agregan al hormigón tenacidad, ductilidad y resistencia a impactos. Estas pueden llegar a sustituir las armaduras en las estructuras y evitan la fisuración del hormigón a tempranas edades. Las macrofibras sintéticas utilizadas en este trabajo de investigación fueron las siguientes: MasterFiber 254 Basf, 54 mm de longitud, 0,81 mm de diámetro equivalente. Referente a las fibras de acero se utilizaron fibras del tipo 3D DRAMIX 65/35 BG, 35 mm de longitud, 0,55 mm de diámetro equivalente. La Figura 11 corresponde a las fibras de acero (a) y poliméricas (b), las cuales serán utilizadas en las amasadas a ensayar.

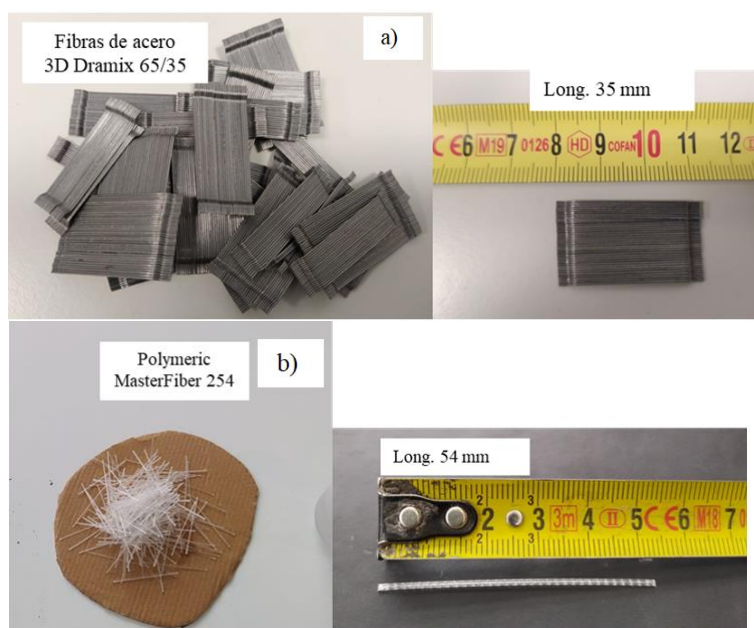


Figura 11 a) Fibras de acero utilizadas en el ensayo; b) Fibras poliméricas utilizadas en el ensayo.

3.4 Metodología

3.4.1 Dosificación y amasado

La dosificación de las mezclas se muestra en la Tabla 6, se prevé que a los 28 días de curado bajo cámara los ensayos de resistencia por compresión simple deben arrojar entre 30/37 MPa. El diseño de mezcla utilizado fue tomado como referencia de varios proyectos en los cuales se incluía ya el contenido de fibras, tanto macrofibras sintéticas como fibras de acero.

Tabla 6 Dosificación del hormigón para 1m³.

Dosificación 30/37 MPa		
Componentes	Dosificación	Unidad
Grava 16/20 mm	183	kg/m ³
Grava 8/16 mm	402	kg/m ³
Grava 4/8 mm	146	kg/m ³
Arena roja	897	kg/m ³
Arena blanca	211	kg/m ³
CEM I, 42,5 R-SR5	280	kg/m ³
Agua Efectiva	154	kg/m ³
Agua Total	190	kg/m ³
Master Fiber 254	7	kg/m ³
Aditivo	0,60 *	% sobre el peso del cemento
Desairante	0,40	% sobre el peso del cemento

* La cantidad de aditivo se ajustó según el tipo de fibra para conseguir un asentamiento alrededor de los 20 cm.

Los criterios utilizados para el diseño de mezcla se basan en la teoría de Bolomey, para agregados de machaqueo, se busca lograr una mezcla plástica que pueda ajustarse fácilmente a los encofrados.

El procedimiento de amasado se establece fijando y midiendo el tiempo de amasado, esto hasta lograr una pasta homogénea y con las resistencias esperadas. El procedimiento se llevó a cabo en una mezcladora planetaria P375T08 con capacidad de 560 lts., ver Figura 12 a), con un rendimiento de 15 m³/h.

Minuto 0: adición de grava y arena

Minuto 1: adición de cemento

Minuto 5: adición del agua total (vertido lento)

Minuto 6: adición de aditivos superplastificante (vertido lento)

Minuto 10: adición de fibras (esparciendo con la mano lentamente)

Minuto 14: fin de amasado (se examina si la mezcla esta homogénea y se toma un control de la consistencia).

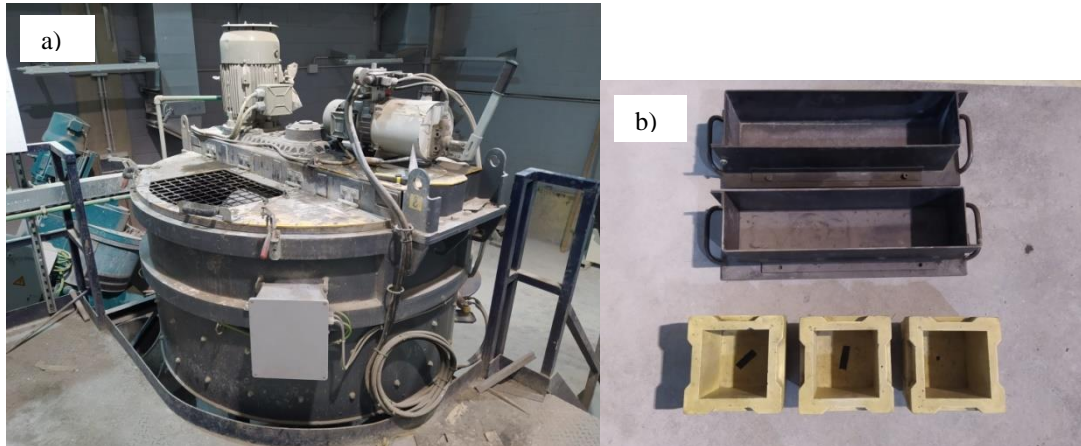


Figura 12 a) Amasadora planetaria Modelo P375T08, b) Moldes para las probetas prismáticas y cúbicas.

Los moldes utilizados para los ensayos a flexotracción pertenecientes a las muestras prismáticas y cubicas, ver Figura 12 b), lo establece la norma UNE EN 14651 y constan de las siguientes dimensiones (550 x 150 x150) mm³ respectivamente. En cambio, para los ensayos de resistencia a la compresión, se tomaron los exigidos por la norma UNE – EN 12390, dimensiones (150x150x150) mm³.

Luego de introducir el hormigón en los moldes, se toma una porción de hormigón para determinar el contenido de aire ocluido por amasada, la Figura 13 a), b) y c) muestran el equipo y los utensilios utilizados para medir el contenido de aire en las amasadas estudiadas.

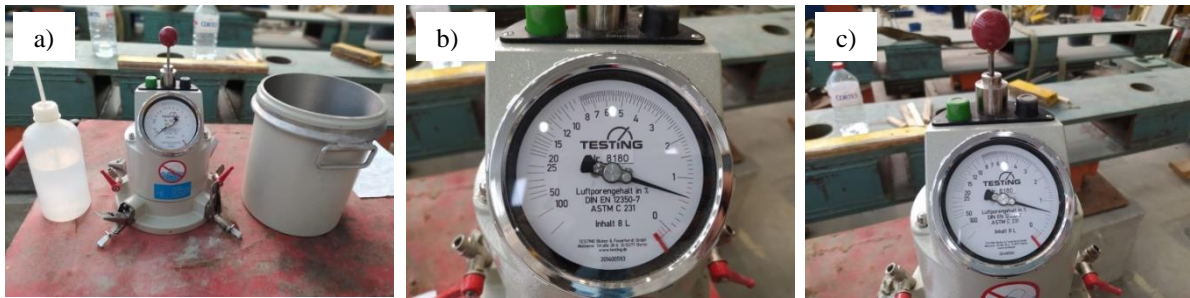


Figura 13 a) Utensilios utilizados para la determinación del contenido de aire ocluido, norma UNE-EN 12350-7, b) y c) Medición obtenida de contenido de aire en la amasada.

Pasadas las 24 horas de fraguado y endurecimiento del hormigón, se retiraron de los moldes y fueron sometidas a un tiempo de curado de 28 días en cámara a 98% de humedad, con la finalidad de lograr un mejor grado de hidratación que permita al hormigón desarrollar sus propiedades resistentes. La Figura 14 a), b) y c) muestran las cámaras utilizadas para el curado de las probetas.



Figura 14 a) Cámara húmeda, b) probetas en conservación 98% de humedad, c) distribución de las probetas

3.5 Ensayos de control del hormigón

3.5.1 Consistencia

Los ensayos de consistencia se realizaron bajo la norma UNE EN 12350. Este ensayo tiene como finalidad determinar la docilidad del hormigón, de acuerdo a la norma EHE-08 la docilidad del hormigón será la necesaria para que, con los métodos provistos de puesta en obra y compactación, el hormigón rodee las armaduras sin solución de continuidad con los recubrimientos exigibles y rellene completamente los encofrados sin que se produzcan

coqueras. La Figura 15 a) y b) muestran el proceso para obtener la consistencia de las amasadas.

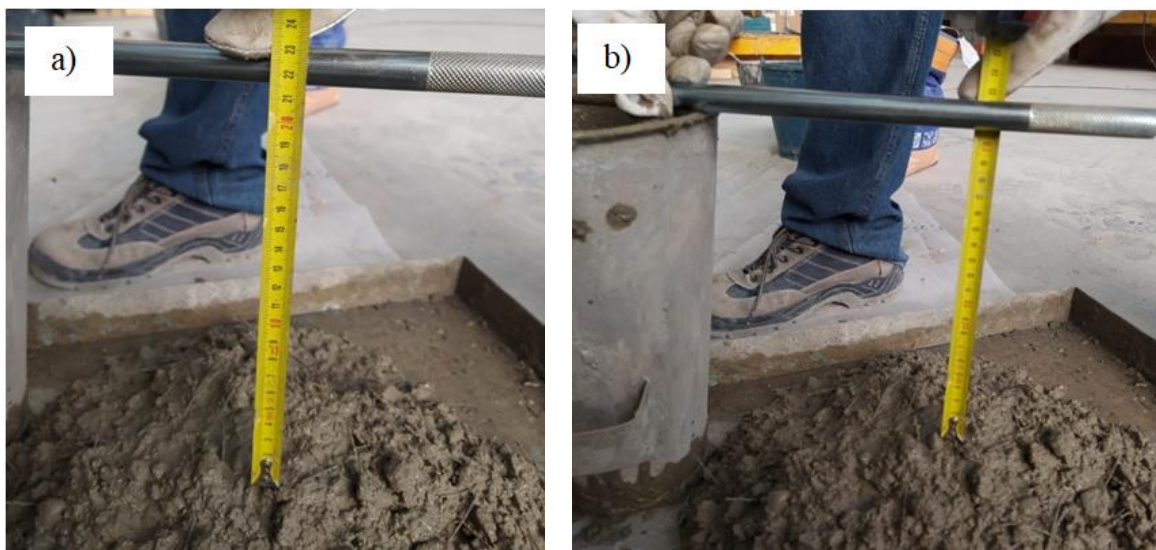


Figura 15 a) y b) Medición de la consistencia bajo la norma UNE-EN -12350

Las amasadas analizadas luego del mezclado arrojaron una consistencia promedio entre los 17-22 cm, es decir las muestras fueron fluidas, aptas para la realización de los ensayos de manera correcta.

3.5.2 Contenido de aire

Los ensayos de contenido de aire ocluido, se realizaron bajo la norma UNE EN 12350. Esta norma describe el método para la determinación del contenido de aire en el hormigón fresco compactado, fabricado con áridos de pesos normal o relativamente densos, de tamaño máximo inferior a 63 mm.

El método utilizado para medir el contenido de aire es el manómetro, el cual consiste en introducir una muestra de hormigón cuyo volumen de aire es desconocido en una cámara de aire sellada, a la que se aplica un volumen de aire conocido a una presión también conocida. El dial del manómetro se calibra en términos de porcentaje de aire para la presión resultante. La Figura 16 muestra el procedimiento para determinar el contenido de aire mediante el uso del manómetro.

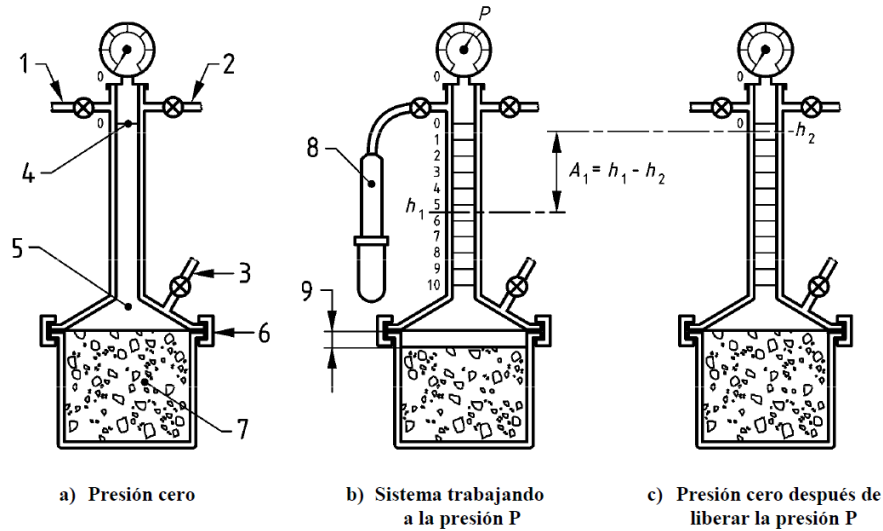


Figura 16 Uso del manómetro bajo la norma UNE-EN 12350.

Leyenda:

1 Válvula de antirretorno, 2 válvula de aireación, 3 válvula de purga, 4 marca, 5 Agua, 6 Abrazadera, 7 hormigón, 8 bomba de aire y 9 nivel de presión más bajo. h_1 (lectura a la presión p) y h_2 (lectura a la presión cero después de liberar la presión P).

Se calcula el contenido de aire del hormigón en el recipiente, A_c mediante la fórmula:

$$A_c = A_1 - G \quad \text{ecuación 3}$$

Dónde, A_1 es el contenido de aire aparente de la muestra ensayada; G es el factor de corrección del árido. $G = 0$ si no se mide o proporciona en el anexo nacional. El contenido de aire se expresa en porcentaje redondeado al 0,10% más cercano.

3.6 Resistencia a compresión a temperatura ambiente

Los ensayos de rotura por compresión son tomados en cuenta en esta tesis de investigación. La guía para realizar los ensayos hacen referencia a la norma UNE-EN 12390. En este caso los ensayos de compresión fueron realizados en una maquina IBERTEST conforme a la norma UNE-EN 12390 mediante el programa WINTTEST 32, ver Figura 17 dónde se muestran la máquina utilizada. Todos los parámetros requeridos fueron tomados de la norma UNE EN 12390.



Figura 17 Ensayo Resistencia a compresión simple, Norma UNE-EN 12390.

Para obtener la resistencia a compresión, los parámetros utilizados fueron lo que se describen en la (ecuación 4), suministrados por la norma UNE-EN 12390.

$$f_c = F/A_c \quad \text{ecuación 4}$$

Dónde f_c es la resistencia a compresión en MPa, F es la carga máxima en rotura en N, A_c es el área transversal de la probeta sobre la que actúa la fuerza de compresión, calculada a partir de las dimensiones normalizadas de la probeta (ver norma UNE-EN 12390) o de las medidas de la probeta de acuerdo con el anejo B en mm^2 . La resistencia a compresión debe expresarse redondeándolas al 0,5 MPa (N/mm^2) más cercano.

En total se ensayaron 36 probetas cubicas, 3 probetas por temperatura y tipo de fibra.

3.7 Métodos para la exposición a temperaturas moderadas

El proceso experimental que se llevó a cabo en esta tesis de máster para evaluar el comportamiento de SFRC y SNFRC a temperaturas moderadas, es el que se describe en la Figura 18, donde se ensayan muestras pre-fisuradas y no pre-fisuradas utilizando fibras poliméricas y de acero.

Hoy en día no existe un protocolo para evaluar los efectos de las temperaturas moderadas en el hormigón reforzado con fibras. Aplicaremos la prueba Three-Point Bending Test

(TPBT), usada para determinar la resistencia a tracción por flexión del hormigón con fibras metálicas sobre probetas moldeadas de acuerdo a la norma europea UNE-EN 14651, esto con la finalidad de estudiar la influencia de la temperatura en hormigones reforzados con fibras en los rangos de (-15, 20 y 60 °C). Sólo se tomara en cuenta el comportamiento a corto plazo después de 3 días de conservación para fibras reforzadas tanto poliméricas como de acero.

También utilizaremos pruebas de resistencia a compresión bajo la norma UNE-EN 12390 como información complementaria a nuestra investigación.

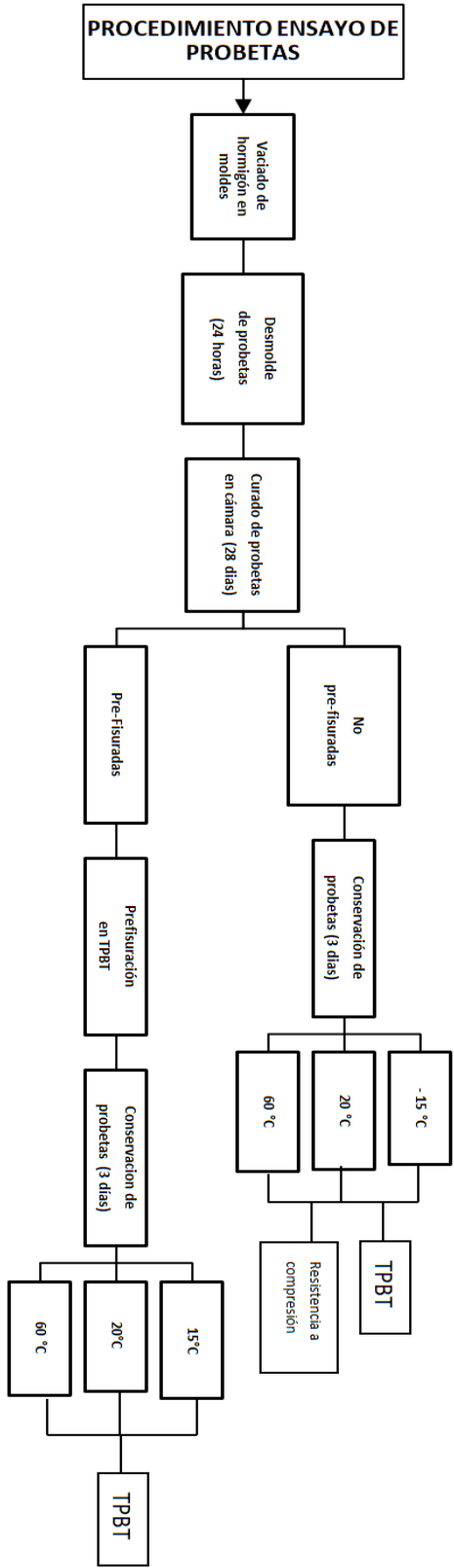


Figura 18 Procedimiento de ensayo de probetas a temperaturas moderadas.

En las pruebas de hormigón fresco se tomará una porción para la realización de los ensayos del contenido de aire y asentamiento, sin embargo, para el hormigón endurecido se utilizarán los volúmenes equivalentes contenidos en las probetas prismáticas que constan de unas dimensiones de (150x150x600) mm³ bajo la norma UNE-EN14651 para un total de 14 probetas por amasadas donde incluimos las probetas pre-fisuradas y las no pre-fisuradas.

Las probetas a compresión serán ensayadas el mismo día que se rompa la serie correspondiente al ensayo a flexotracción utilizando la norma UNE EN 8350, conformadas por las dimensiones de (150x150x150) mm³. Se realizarán 6 probetas por amasada, tomando en cuenta que las probetas a compresión sometidas a temperaturas moderadas siguen la norma para los parámetros de ensayo pero las condiciones de las probetas son distintas.

Antes de pasar las probetas a sus condiciones de conservación (3 días antes de llevar a cabo los ensayos) se procede a realizar la entalla de 25 mm de altura, tomada desde la base de la probeta, tiene como finalidad marcar el centro de la probeta donde se colocara el captador de desplazamiento y se obliga a fisurar la probeta en esta zona marcada; esta entalla debe realizarse de acuerdo a las especificaciones de la norma UNE-EN 14651.

Luego de haber pasado las probetas 28 días en cámaras húmedas, aquellas que pertenecen a la campaña de pre-fisuradas, se sacan de la cámara, se pre-fisuran hasta llegar a una abertura de fisuras de 0.5 mm, luego son devueltas a la cámara de conservación para ser ensayadas a las temperaturas correspondientes.

Cabe decir, que todas las piezas condicionadas a temperaturas moderadas se aíslan de manera tal que el ensayo se realice a la temperatura de interés y no a temperaturas residuales, ya que se podrían ver alterados los resultados esperados.

3.7.1 Equipos para la exposición a temperaturas moderadas

Para llevar las probetas a la temperatura de -15 °C, ver Figura 19 a) y b) donde se muestran los dos congeladores utilizados para el ensayo, de orientación vertical, marca ROMMER Modelo CH 302 T con sistema cooling que pudieran no solo llegar a estas temperaturas, sino que fueran capaces de soportar el peso y la cantidad de probetas a ensayar

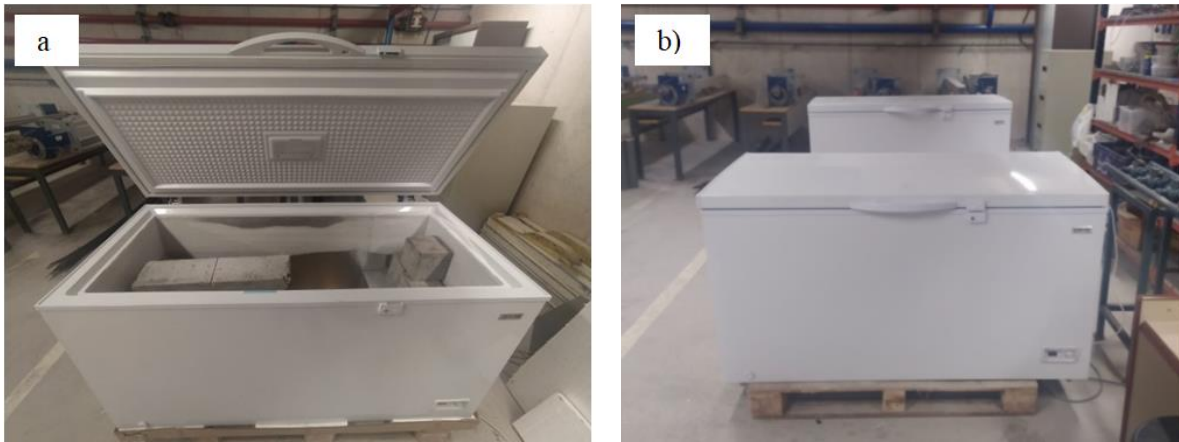


Figura 19 a) Congeladores marca Rommer, modelo CH 302, b) congelador en servicio.

Para la temperatura de 20°C, no fue necesario instalar dispositivos, es una temperatura ambiente y todos los ensayos se realizaron a temperatura, tanto los de flexotracción como los de compresión.

Respecto a las probetas ensayadas a 60 °C, fueron sumergidas en dos depósitos diseñados para tales fines, contruidos con hormigón de alta resistencia y constan de las siguientes dimensiones (139x70x70) cm³. La Figura 20 a), b) y c) ilustran los depósitos utilizados para las probetas a temperatura, estos estanques han sido equipados con calentadores sumergidos hasta lograr la temperatura de 60°C. Se le coloca una cubierta en la parte superior para mantener la temperatura de conservación. El tiempo que permanecerán las probetas sumergidas es de 3 días. Este ensayo se realiza con la finalidad de imitar las temperaturas moderadas que ocurren en gran parte del mundo.

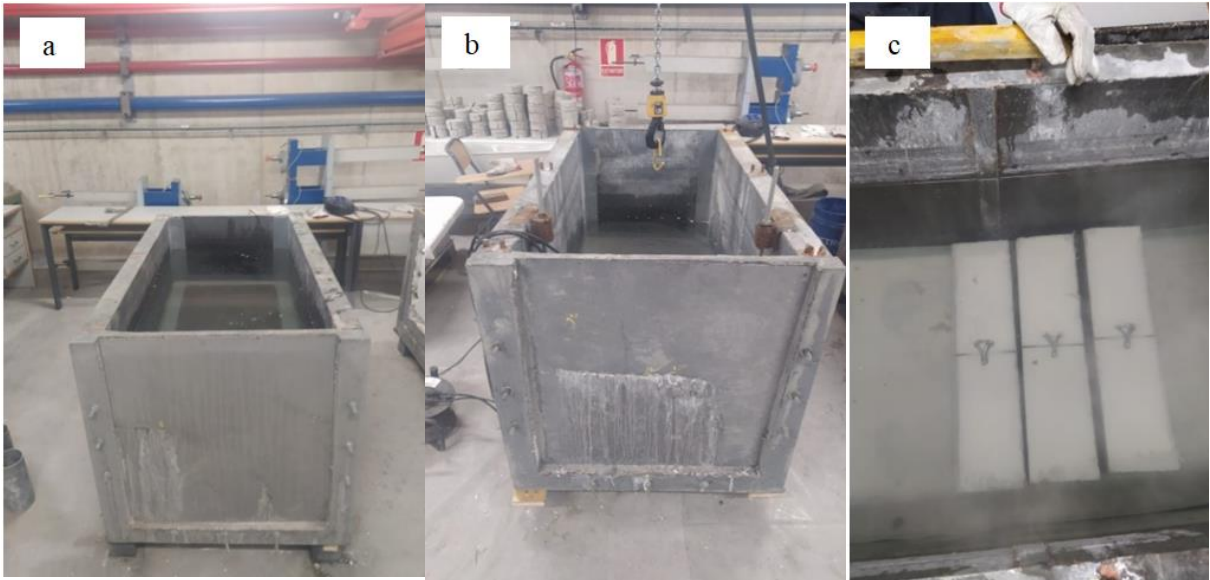


Figura 20 a) Depósito sin equipos, b) Depósito con sistema de calefactores instalados, c) Vista de probetas en los depósitos a temperatura de conservación.

Luego de completado el tiempo de conservación de las probetas en caliente y en frío, se procedió a realizar el ensayo a flexotracción de acuerdo a la norma UNE EN 14651, tratando siempre de mantener las temperaturas de ensayo mediante los geles y la protección de polietileno expandido.

3.8 Ensayos a temperatura

3.8.1 Resistencia a compresión a temperaturas moderadas.

La norma UNE-EN 12390 trata sobre la resistencia a compresión del hormigón endurecido, aquí las probetas se comprimen hasta rotura en una máquina de ensayo a compresión conforme a la norma y se registra la máxima carga alcanzada por la probeta, luego se calcula la resistencia a compresión del hormigón.

Durante estos ensayos de resistencia a compresión para poder mantener la temperatura tanto exterior como interna de las muestras, se colocaron aisladores de poliestireno expandido en las cuatro caras laterales del espécimen justo antes de iniciar el ensayo. Ver Figura 21 donde se muestra el procedimiento realizado.



Figura 21 Ensayo de resistencia a compresión simple UNE-EN 12390, con poliestireno expandido

El objetivo de realizar los ensayos de resistencia a compresión es controlar la regularidad del hormigón, la calidad de su fabricación y sus propiedades mecánicas. Se decidió estudiar la resistencia a compresión a temperatura debido a que la matriz hormigón-fibras puede presentar variaciones en sus propiedades mecánicas.

3.9 Ensayos a flexotracción sometidos a temperaturas moderadas

3.9.1 Ensayo a flexotracción estándar

La norma UNE-EN 14651 especifica un método de determinación de la resistencia a la tracción por flexión del hormigón con fibras metálicas sobre probetas. El método permite determinar el límite de proporcionalidad elástica (F_{LOP}) y un conjunto de valores de la resistencia residual a la tracción por flexión.

Este método de ensayo está previsto para fibras metálicas de una longitud de 60 mm. Dicho método puede aplicarse igualmente para una combinación de fibras metálicas y para una combinación de fibras metálicas con otras fibras. Esta norma permite un tamaño máximo de agregados de 32 mm, la norma fue adaptada para trabajar con macrofibras sintéticas respetando el tamaño máximo de agregados gruesos.

Sabiendo que no existe normativa para realizar los ensayos de flexotracción a las temperaturas mencionadas, se desarrolló un protocolo específico. Es importante distinguir

el proceso de pre-fisuración sobre el resto de los procesos. Las fases del proceso son las siguientes: i) fase de pre-fisuración a temperatura ambiente a los 28 días de curado, ii) prueba de los tres puntos (TPBT) a temperaturas moderadas.

El proceso de pre-fisuración fue controlado mediante el Crack Mode Opening Displacement (CMOD). Se inicia el ensayo hasta que llega a un CMOD: 0,5 mm de abertura de fisura, este valor se obtiene sometiendo la viga a cargas de servicio, se coloca un captador o transductor de desplazamiento en la cara inferior de la viga a ensayar justo en el centro de la entalla. La Figura 22 a) y b) muestran el captador de desplazamiento utilizado IP 54, Serie TEX con una carrera de 10 mm en su diseño compacto y está diseñado de acuerdo a la norma DIN EN 60529. Es un captador de poco peso, resistente a temperaturas extremas, al polvo y a la penetración de agua.

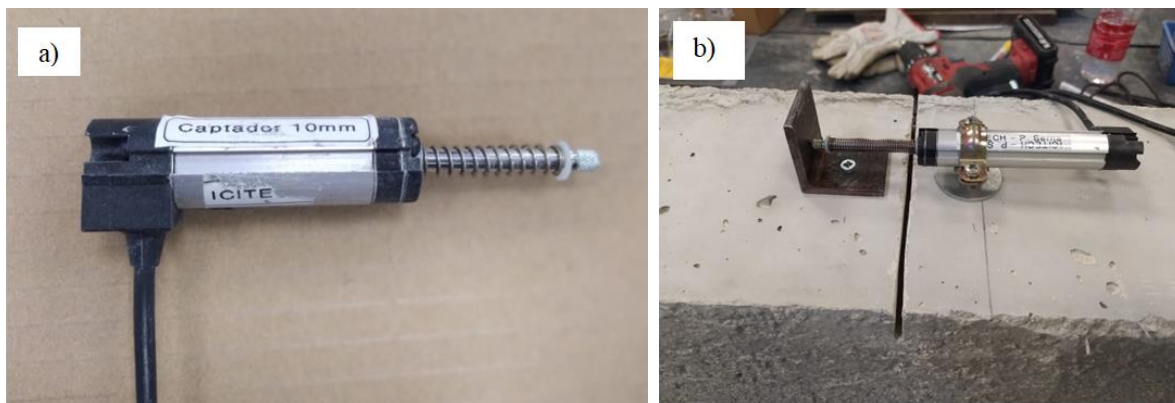


Figura 22 a) Captador de desplazamiento SERIE TEX IP-54, b) Captador de desplazamiento instalado en probeta.

De acuerdo a la norma UNE EN 14651 la anchura media de la probeta y la distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta en la sección de centro de vano debe determinarse a partir de dos dimensiones efectuadas con ayuda de un calibre, con una precisión de 0,1 mm, de la anchura y de la distancia en la parte entallada de la probeta.

Cuando se mide el desplazamiento del borde de la fisura (o de la entalla), se debe instalar un transductor de desplazamiento a lo largo del eje longitudinal, en la mitad de la anchura de la probeta, de modo que la distancia entre la parte inferior de la probeta y la línea de medición sea inferior o igual a 5 mm. Ver la Figura 23 a) y b).donde se describen estos procesos.

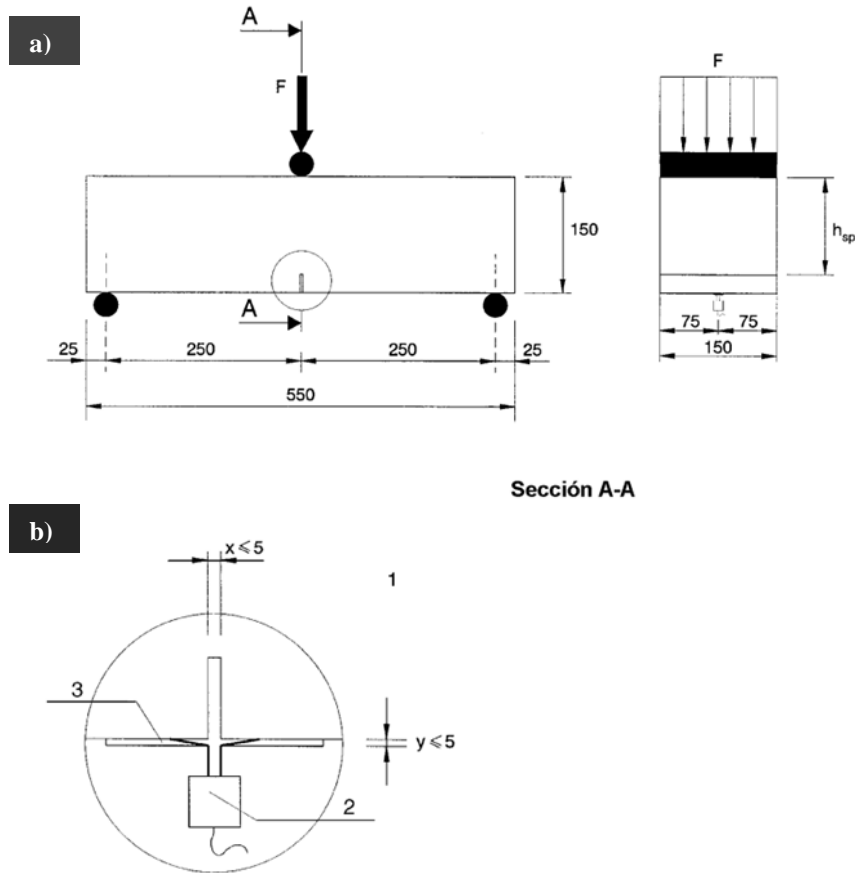


Figura 23 a) Configuración típica para la determinación del CMOD, b) vista en sección de la entalla, según norma UNE-EN 14651.

Leyenda

1 Detalle (entalla), 2 Transductor (galga abrazadera) y 3 Borde de lámina biselada

De acuerdo al proceso descrito en la Figura 23, la línea de medida es la distancia y la cual está en la parte inferior de la muestra. En este sentido, $CMOD_y$ es el valor obtenido directamente durante la prueba y $CMOD$ debe ser obtenido con la (ecuación 4).

$$CMOD = CMOD_y \cdot \frac{h}{h+y} \quad \text{ecuación 5}$$

Siendo h la altura total de la probeta. Considerando la información previa, con la finalidad de continuar con el ensayo, tanto la célula de carga como el sector de desplazamiento fueron conectados al equipo de adquisición de datos (DAE). El primer paso es configurar el software y ajustarlo a la norma, luego aplicar una precarga entre 1 y 4 kN con la finalidad de optimizar el tiempo de prueba. En ese mismo orden se le aplica una velocidad de 0,05

mm/min hasta que se consiga la fisura a un CMOD de 0,5 mm, mayormente siempre coincide con el límite de fisuración. Es importante saber que la fuerza fue incrementada de acuerdo a la norma UNE EN 14651. Luego el sistema y el transductor son retirados de la probeta para ser retornados a su correspondiente estado de conservación, donde esperaran la segunda parte del ensayo que es realizada a los 3 de haber sido conservadas a las temperaturas correspondientes.

Después del periodo de conservación, el ensayo de los tres puntos debe ser configurado con la misma información que la primera fase, sólo con la diferencia de velocidad de aplicación de la carga, en este caso será de 0,2 mm/min desde un CMOD= 0,5mm hasta alcanzar un CMOD de 4 mm y completar el ensayo.

Para los ensayos de probetas no pre-fisuradas, la metodología desarrollada es en un único ensayo de acuerdo a la UNE-EN 14651. El resultado de la curva para los ensayos no pre-fisurados y pre-fisurados se muestran en la Figura 24.

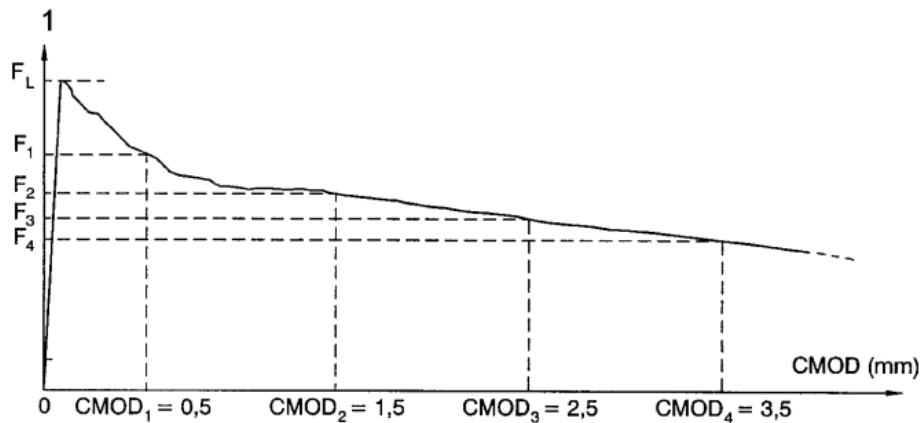


Figura 24 Diagrama de carga CMODy y F_j ($j=1, 2, 3,4$), según norma UNE EN 14651.

Dónde F representa la carga. La resistencia residual a la tracción por flexión debe expresarse con una precisión de $0,1 \text{ N/mm}^2$.

Una vez finalizado el test, se procede al conteo de las fibras contenidas por cada probeta tanto las poliméricas como las de acero, esto tiene como finalidad determinar la densidad de las fibras y compararla con su rotura. Se toman fotografías durante el ensayo y luego de este haber finalizado.

Cada ensayo a flexotracción posee una duración promedio de 35 minutos contando desde el momento en que se inicia la aplicación de la carga de manera manual hasta que la probeta llega a la abertura de fisura de 4 mm.

Finalmente, se procede a calcular la resistencia a flexotracción. El momento flector en el centro del vano de la probeta correspondiente a la carga puntual F es el siguiente:

$$M = \frac{F}{2} * \frac{l}{2} \quad \text{ecuación 6}$$

Asumiendo una distribución lineal de las tensiones, el límite de proporcionalidad elástico (F_{LOP}) y la resistencia residual a tracción por flexión vienen dado por las siguientes expresiones:

$$f_{ct,l} = \frac{6M_l}{bh_{sp}^2} = \frac{3F_{Ll}}{2bh_{sp}^2} \quad \text{ecuación 7}$$

$$f_{R,j} = \frac{6M_j}{bh_{sp}^2} = \frac{3F_{Lj}}{2bh_{sp}^2} \quad \text{ecuación 8}$$

Donde, F_L es la carga correspondiente al LOP ; F_j es la carga correspondiente al $CMOD_j$ o a δ_j ($j= 1,2,3,4$); M_L es el momento flector correspondiente a la carga en el LOP ; M_j es el momento flector correspondiente a la carga F_j ($j= 1,2,3,4$); b es la anchura de la probeta; h_{sp} es la distancia entre el fondo de la entalla y la parte superior de la probeta en la sección de vano.

El proceso de pre-fisuración en este trabajo de investigación se ejecutó tomando en cuenta el control de $CMOD$. Las vigas fueron pre-fisuradas hasta alcanzar un $CMOD = 0,5\text{mm}$. Se tomó $0,5\text{mm}$ como el límite del ancho de fisura para el FRC , el proceso se realizó con la finalidad de imitar el estado de pre-fisuración que presentan algunas estructuras en la actualidad. De esta forma estaríamos analizando el comportamiento en estado pre-fisurado y no pre-fisurado sometido a temperaturas moderadas.

3.9.2 Modificaciones para realizar el ensayo a temperaturas moderadas.

Para poder estudiar los efectos de temperatura en el hormigón reforzado con fibras tanto en estado pre-fisurado como no pre-fisurado, las probetas deben permanecer con la temperatura de estudio mientras se realiza la prueba en su totalidad.

Para mantener los niveles de temperatura deseados ver Figura 25 a) y b) donde se muestra el sistema de aislamiento térmico empleado, el cual consistió en cubrir la superficie exterior total de las probetas con polietileno expandido y concentraciones de geles a la temperatura deseada. Antes de iniciar el ensayo se mide la temperatura inicial garantizando que se hayan logrado las temperaturas de (-15,20 y 60°C). Se colocó un termopar en cada serie de probetas, esto para controlar y observar el comportamiento de la temperatura interior y obtener así el porcentaje de temperatura que se pierde durante el ensayo correspondiente.

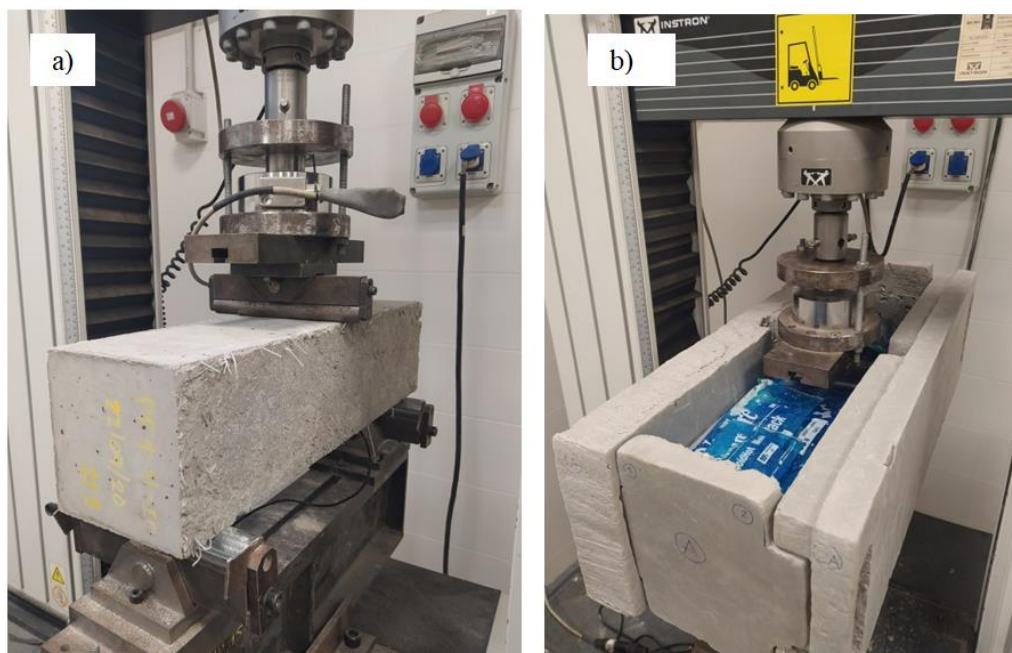


Figura 25 a) Ensayo de los Tres Puntos bajo la norma UNE-EN 14651, b) Ensayo de los tres puntos con cobertores y geles de aislamiento térmico.

Las bolsas de gel utilizadas son de la marca NEXTCARE, consisten en una bolsa activable a frio o caliente, el producto contiene dos compuestos en un único envase que permanecen separados hasta el momento de uso. No es un material tóxico y es 99% degradable lo que hace al producto amigable con el medio ambiente.

En la Figura 26 se muestra el dispositivo utilizado para registrar la variación de las temperaturas durante los ensayos, es un registrador de temperaturas de 8 canales para termopares, modelo TC-08, con conexión a USB al ordenador. Puede medir temperaturas en rango de - 270 hasta más de 1820 °C, funciona con los termopares más habituales. Es un almacenador de datos, registra los datos en la PC. Se pueden obtener gráficas o tabla de datos tipo Excel de manera sencilla; es el dispositivo adecuado para medir las variaciones de temperatura en el interior de las probetas a ensayar. El software que utiliza es el PicoLog 6. Los termopares fueron introducidos durante el proceso de llenado de los moldes de las probetas.



Figura 26 Registrador de temperatura Modelo TC-08

En estructuras de hormigón suele ser irreversible la aparición de fisuras, que no suponen inconveniente para su normal utilización, siempre que se limite su abertura máxima a valores compatibles con las exigencias de durabilidad, funcionalidad, estanqueidad y apariencia. (EHE, 2008)

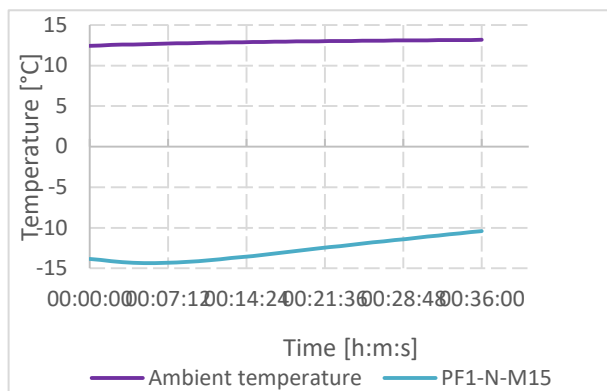
3.9.3 Variación de las temperaturas durante los ensayos

PF1-N-15

Tabla 7 Comparación temperatura ambiente vs temperatura de ensayo PF1-N-15

Amasada	1	
Código	PF1-N-15	
Día de la prueba	05-01-2021	90 días después de 28 días de curado.
Temperatura	°C	-15

Min (°C)	-14,35
Máx (°C)	-10,41
Dif (°C)	3,94
Variación (°C/min)	0,1

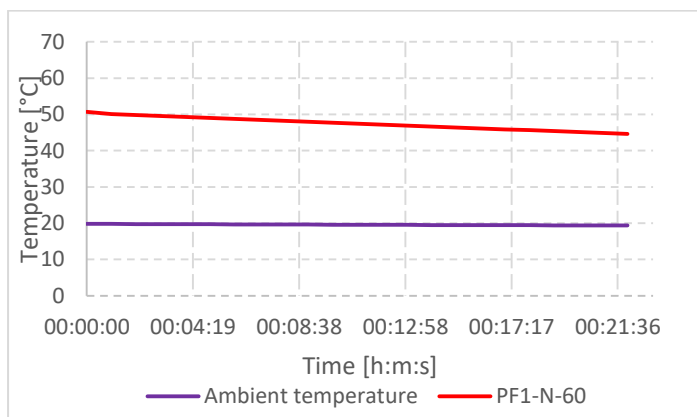


PF1-N-60

Tabla 8 Comparación temperatura ambiente vs temperatura de ensayo PF1-N-60

Amasada	7	
Código	PF1-N-03	
Día de la prueba	27-11-2020	3 días después de 28 días de curado.
Temperatura	°C	60

Min (°C)	44,65
Máx (°C)	49,54
Dif (°C)	4,89
Variación (°C/min)	0,2



SF1-N-60

Tabla 9 Comparación temperatura ambiente vs temperatura de ensayo SF1-N-60

Amasada	10	
Código	SF-N-03	
Día de la prueba	12/02/2021	3 días después de 28 días de curado.
Temperatura	°C	60
Min (°C)	52,41	
Máx (°C)	63,47	
Dif (°C)	11,06	
Variación (°C/min)	0,48	

The graph displays two temperature profiles over time. The y-axis represents Temperature in degrees Celsius, ranging from 0 to 70. The x-axis represents Time in hours, minutes, and seconds, with markers at 00:01:26, 00:08:38, 00:15:50, and 00:23:02. A purple line represents the Ambient temperature, which remains constant at approximately 23°C. A red line represents the SF-N-60 temperature, which starts at 63.47°C at 00:01:26 and decreases to 52.41°C at 00:23:02.

Time [h:m:s]	Ambient temperature [°C]	SF-N-60 [°C]
00:01:26	23	63,47
00:08:38	23	59,00
00:15:50	23	55,00
00:23:02	23	52,41

Estos ensayos de prueba de temperatura fueron realizados de acuerdo se especifica en el capítulo III, aquí se describe el instrumento que se utilizará y como se realizará el procedimiento. En cada una de las amasadas realizadas se colocó un termopar el cual registra la temperatura interior de la muestra. Para la Tabla 7 bajo la condición de -15°C PF1-N, se puede observar que se colocó el experimento con una temperatura inicial de -14,35 °C y terminó con -10,41 °C, para una pérdida de temperatura de solo 3,90°C en un tiempo de 36 minutos aproximadamente, este valor es representativo y nos dice que no se pierde mucha temperatura durante el experimento gracias a la colocación de aisladores en la parte lateral y superior de las probetas.

Las pruebas de temperatura durante la campaña solo se realizaron en probetas no pre-fisuradas. No se tomaron en cuenta las probetas pre-fisuradas para el análisis de variación de temperatura debido a la posibilidad de presentar un comportamiento parecido a una de las caras exteriores durante la pre-fisuración.

En la Tabla 8 PF1-N-60, la temperatura inicial correspondía a 49,54 °C, terminó el experimento con una temperatura igual a 44,65 para una pérdida de calor de 4,89 y un tiempo 21:36 minutos. Estos son valores aceptables para una conservación dada, mantienen una temperatura que disminuye muy poco durante el ensayo, por lo tanto, las muestras ensayadas cumplieron con los parámetros propuestos.

Para la condición SF1-N-60, Tabla 9 no se obtuvo un resultado satisfactorio, el ensayo se inició con una temperatura de 63,47°C y terminó con una temperatura de 52,41 °C para una pérdida de 11,06 °C durante el ensayo. Este valor es superior a los antes obtenidos en los ensayos previos, aquí no se tuvo un comportamiento adecuado y se perdió más calor durante el ensayo que duro unos 23:02 minutos, esta pérdida de temperatura podría ser debido a demoras en el proceso de extraer el espécimen del depósito en conservación y transportarlo a la máquina de ensayo.

CAPÍTULO IV- RESULTADOS Y ANÁLISIS

Introducción

Este capítulo presenta los resultados de la campaña experimental y un análisis de los mismos, a fin de tener un entendimiento claro sobre el comportamiento del hormigón reforzado con fibras poliméricas sometido a temperaturas moderadas.

4.1 Resultados de control

4.1.1 Consistencia

La consistencia del hormigón se evaluó mediante la prueba del asentamiento siguiendo la norma UNE-EN 12350-2: 2009 como se ha mencionado en el capítulo III. Esta prueba se realizó con la finalidad de determinar las variaciones de consistencia que pudieran existir en las amasadas realizadas. La Tabla 10 representa esa variación de consistencia por amasada. En general, cuando se agregan fibras al hormigón este disminuye su consistencia, pero generalmente se puede compensar con el uso de aditivos.

Tabla 10 Consistencia de las amasadas PF y SF.

Tipo de Fibra	Temp. ° C.	# de amasada	Consistencia (cm)	Promedio (cm)	Desviación Estándar (cm)
PF1 A1	-15	1	22,00	20,83	1,65
PF2 A3	20	3	22,00		
PF3 A7	60	7	18,50		
SF1 A5	-15	5	17,00	19,17	2,39
SF2 A4	20	4	18,00		
SF3 A10	60	10	22,50		

Las amasadas se realizaron bajo la dosificación equivalente de fibras poliméricas y de acero, arrojando una consistencia promedio de 20,83 cm y desviación estándar de 1,65 cm para el SNFRC, en cambio, para las SFRC se obtuvo un promedio de 19,17 cm y desviación estándar de 2,39 cm para las SFRC, esto equivale a un promedio de 8% de menor consistencia el SFRC respecto al SNFRC. De acuerdo al EHE -08 con un cono promedio de 19,5 cm estaríamos trabajando con una consistencia líquida (L). Con este valor aseguramos que la colocación del hormigón en las probetas fácilmente y que la compactación sea efectiva.

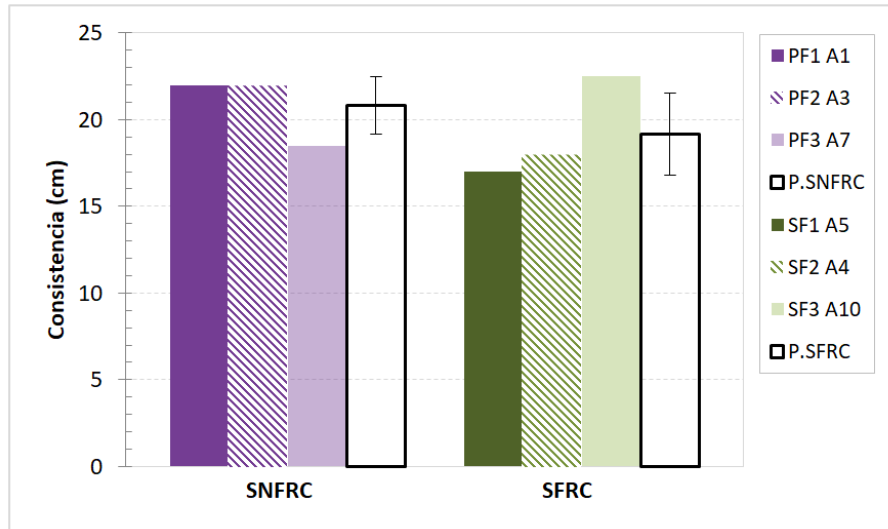


Figura 27 Representación de los resultados de consistencia para el SNFRC y SFRC

Como se puede observar en la Figura 27 el SFRC presentan una mayor desviación estándar respecto a las poliméricas en promedio. La consistencia es variable pero aceptable para el proceso de hormigonado. La cantidad de superplastificante para las SNFRC fue de $\pm 0,6\%$, en cambio, para las SFRC fue de $\pm 1,20\%$ estos porcentajes no se adicionaron en su totalidad, sino se iban agregando de acuerdo a la consistencia observada, pudo haber variaciones considerables entre una amasada y otra, esta acción se realizó para conseguir una consistencia equivalente entre las amasadas.

Se observa que la consistencia disminuye al momento de aplicar fibras poliméricas o de acero, esta disminución se puede contrarrestar con la aplicación de aditivos superplastificante; el cual no sólo reducirá la cantidad de agua añadir, sino que permitirá obtener consistencias altas.

4.1.2 Aire ocluido y densidad

El valor promedio del contenido de aire ocluido en las amasadas estudiadas es de $\pm 6\%$, de acuerdo a la norma UNE-EN 12350 la cantidad total de aire ocluido no excederá el 6% en volumen.

Se puede observar en la Tabla 11 el contenido de aire en las 6 amasadas realizadas, se obtuvo un rango de 0,30 hasta 1,10 %, son valores aceptables para los cuales fueron diseñadas las amasadas correspondientes.

Tabla 11 Contenido de aire ocluido por amasada ensayadas.

Tipo de fibra	# de Amasada	Aire ocluido (%)	Promedio (%)	Desviación Estándar (%)
PF1 A1	1	0,80		
PF2 A3	3	0,60	0,57	0,13
PF3 A7	7	0,30		
SF1 A5	5	1,10		
SF2 A4	4	0,45	0,63	0,33
SF3 A10	10	0,35		

El contenido de aire puede influir en la consistencia, resistencia y durabilidad del hormigón, esto depende en gran medida del tipo y la forma de la fibra. (Guerini et al., 2018).

De acuerdo a la representación de los valores de contenido de aire y consistencia de las amasadas, en la Tabla 11 se puede observar que la amasada No.5 arroja el mayor contenido de aire ocluido (1,10%) respecto a las demás, agregando a esto la baja consistencia de la pasta de 17cm, esto tiene sentido a menor consistencia mayor contenido de aire ocluido.

4.2 Resistencia a compresión a temperatura ambiente

El objetivo de los ensayos de resistencia a compresión a temperatura ambiente, era controlar la regularidad del hormigón, la calidad de su fabricación y sus propiedades mecánicas. En esta fase no se sometieron a temperatura las probetas, se mantuvo la temperatura ambiente. La Tabla 12 muestra un resumen detallado de los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión a temperatura ambiente.

Tabla 12 Resultados obtenidos de las pruebas de resistencia a compresión a temperatura ambiente

Resistencia a compresión a temperatura ambiente				
# de amasada	Temp. °C	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)
PF1 A1	20 °C	35,00		
PF2 A3	20 °C	36,00	35,00	0,82
PF3 A4	20 °C	34,00		
SF1 A5	20 °C	36,50		
SF2 A7	20 °C	35,00	32,50	4,64
SF3 A10	20 °C	26,00		

Se puede observar que los resultados de los ensayos de resistencia a compresión realizados mediante la norma UNE-EN 12390 poseen similitud, a diferencia de la amasada SF3 A10, la cual representa una variación de un 20% respecto al promedio. La diferencia en resistencia se debió a factores externos, las temperaturas disminuyeron considerablemente durante el amasado y puesta de la pasta en los moldes.

De acuerdo a la Figura 28 los resultados se mantuvieron por encima de los 32 MPa, a excepción de la amasada No. 10 debido a las razones antes mencionadas. La resistencia promedio fue de 25/30 MPa, una resistencia aceptable para los ensayos que se llevaron a cabo.

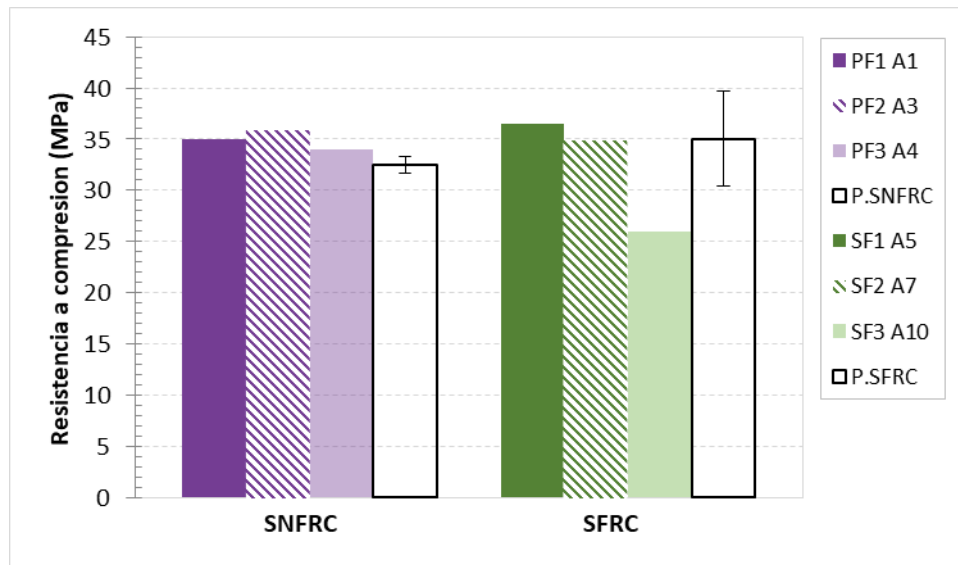


Figura 28 Representación gráfica de los resultados de resistencia a compresión, mediante la Norma UNE-EN 12390.

4.3 Ensayos a temperaturas moderadas

4.3.1 Resistencia a compresión a temperaturas moderadas

La resistencia a compresión del hormigón endurecido fue evaluada mediante la norma UNE-EN 12390. Estos ensayos fueron realizados después de terminado el tiempo de conservación de 28 días más los 3 días de conservación a temperatura de evaluación. El proceso de pre-fisuración para determinar tanto el (F_{LOP}) como la resistencia residual (f_{r1}) se realizó a temperatura ambiente, sin embargo, para las muestras no pre-fisuradas los ensayos se realizaron a temperaturas moderadas. Aplica para los ensayos de (-15°C, 20°C y 60 °C).

De acuerdo a las bibliografías estudiadas el agregar fibras a la pasta de hormigón no aumenta de manera significativa la resistencia a compresión del hormigón endurecido. En la Tabla 13 se observa una variación representativa en las resistencias a compresión a temperaturas de ensayo. Los resultados obtenidos a temperatura de conservación vas disminuyendo de acuerdo disminuye la temperatura y viceversa, los efectos de la temperatura debilitan la matriz de la pasta de hormigón y se genera una débil resistencia.

Tabla 13 Resistencias a compresión obtenidas en ensayos a temperatura

Tipo de fibra	Temp. °C	# de Amasada	Resistencia (MPa)	Desviación Estándar (MPa)
PF1	PF1-15 °C	1	47,50	3,18
PF2	PF1 20 °C	3	37,50	1,15
PF3	PF1 60 °C	7	31,50	1,77
SF1	SF1 -15 °C	5	51,50	1,04
SF2	SF1 20 °C	4	34,00	1,80
SF3	SF1 60 °C	10	26,00	0,50

A temperaturas de 60 °C se observa una disminución de la resistencia a compresión, ver Figura 29. De acuerdo va disminuyendo la temperatura va aumentando la resistencia a compresión; para el SNFRC desde -15 °C hasta 20 °C, existe una pérdida de resistencia de un 21,5%; desde 20 °C hasta 60 °C la pérdida es de un 16,0%. En cambio, para el SFRC desde -15°C hasta 20°C existe una pérdida de 33,98%, un 12,93% más que las poliméricas bajo el mismo renglón y desde 20°C hasta 60°C se pierde un 23,53% lo cual equivale a un 7,53% respecto a las poliméricas. Esta disminución de resistencia debido a altas temperaturas se podría atribuir a la desintegración de la matriz. En otro sentido, el aumento de la resistencia a compresión a bajas temperaturas se debe a la formación de hielo en el los poros de los especímenes de acuerdo a (Richardson & Ovington, 2017).

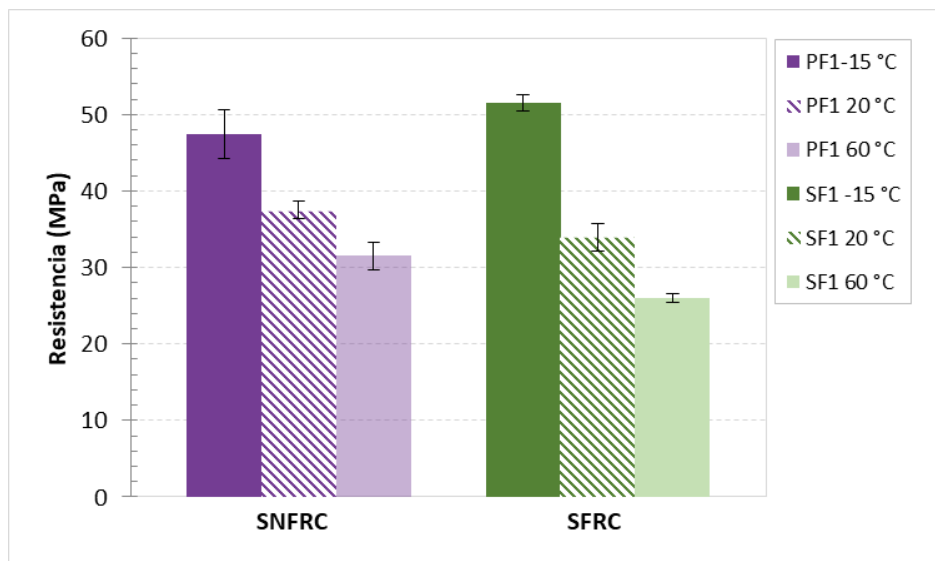


Figura 29 Resistencia a compresión a temperaturas de ensayo.

4.3.2 Ensayo a flexotracción a -15 °C. (PF1-P PF1-N y SF1 P SF1 N)

Para esta temperatura de -15 °C, se evaluaron 7 muestras diferentes para cada serie, a fin de tener una mejor representación de los resultados y poder evaluar los comportamientos entre ellas. Las muestras se colocaron dentro de los depósitos a temperatura de -15 °C por un lapso de tiempo de 3 días.

Luego fueron sometidas al ensayo de flexotracción contenido en la norma UNE-EN 14651 con la finalidad de determinar la resistencia por flexión, límite de proporcionalidad elástico (F_{LOP}) y sus resistencias residuales de mayor relevancia (fr_1 , fr_3) respectivamente.

Las probetas de las series con pre-fisura (PF1-P y SF1 P) se ensayaron en dos fases: la primera fase consistió en una pre-fisuración de la muestra a temperatura ambiente, mediante una carga constante hasta llegar a un $CMOD = 0,5mm$. Luego se lleva la probeta a la condición de temperatura de -15°C obtenida en el congelador; la segunda fase consistió en continuar el ensayo bajo los mismos parámetros de la primera fase, aquí las probetas son evaluadas a la temperatura estudiada.

Los gráficos resistencia vs $CMOD$ elaborados a partir de los resultados de las muestras ensayadas reflejan aspectos comunes para las siete probetas realizadas para cada serie. Antes de fisurarse, presentan un comportamiento lineal-elástico, es una representación similar a la gráfica del hormigón convencional. Este comportamiento se debe a que en esta fase las fibras no representan contribución alguna.

Con las series no pre-fisuradas (PF1-N y SF1 N) de acuerdo a las Figura 31 y Figura 33 los ensayos se realizan en una sola fase. Se ensayan las probetas a la condición de temperatura de -15°C hasta alcanzar un $CMOD = 4mm$, luego se calculan los parámetros correspondientes.

Una vez ocurre la primera fisura, las fibras inician su contribución en el comportamiento mecánico de las probetas, aquí el hormigón comienza a transferir carga a las fibras; estas fibras aportan resistencia al hormigón y reducen la fisuración debido a su adherencia a la pasta, módulo elástico y su propia resistencia.

Por lo tanto, luego de haber aparecido la primera fisura, la carga necesaria para aumentar el CMOD va disminuyendo hasta alcanzar el valor mínimo el cual se asocia con la disminución de la rigidez debido a la fisuración.

La Figura 30 es una representación del SNFRC bajo la condición pre-fisurada, los especímenes muestran comportamientos similares a partir de los 0,50mm de desplazamiento.

La Figura 31 el SNFRC bajo la condición no pre-fisurado el (F_{LOP}) como sus resistencias residuales (fr_1 y fr_3) arrojan resultados más representativos que los SFRC bajo las mismas condiciones representadas en la Figura 33. Bajo esta temperatura de estudio de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ y en condición de no pre-fisurado se obtuvo el máximo (F_{LOP}), equivalente a 6,63 MPa, con una desviación estándar de 0,16 MPa, es decir a menor temperatura mayor F_{LOP} .

La Figura 32 referente al SFRC en estado pre-fisurado, luego de un CMOD de 0,5mm se verifica una meseta muy similar en todas sus gráficas, sin embargo, la Figura No. 30 bajo estas mismas condiciones pero en SNRFC posee resistencias más altas y mejor comportamiento bajo la temperatura de estudio.

-15 °C PF1-P

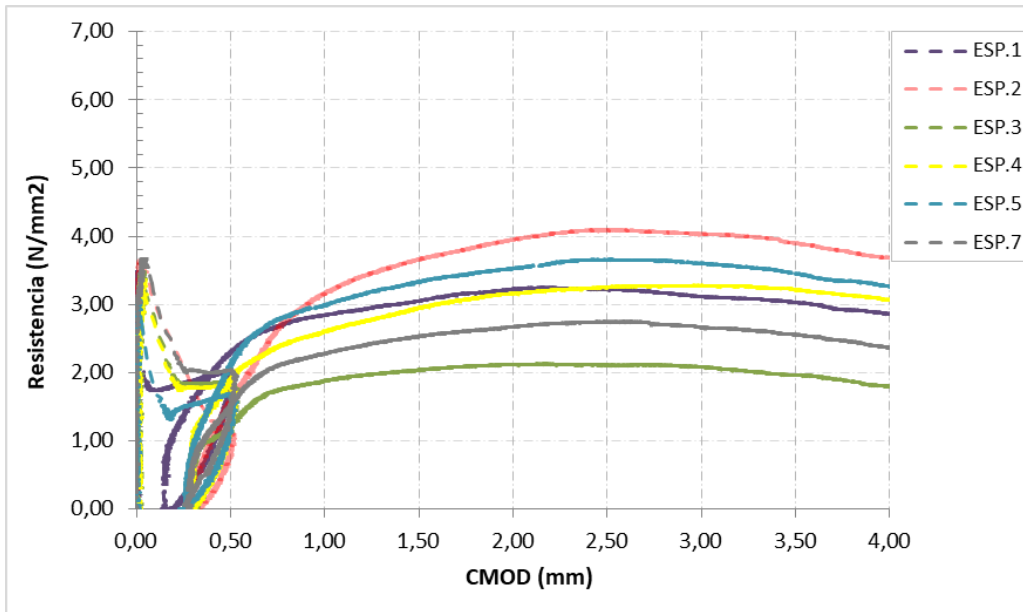


Figura 30; Resultados de ensayos a flexotracción, temperatura de conservación -15 °C PF1-P

-15 °C PF1-N

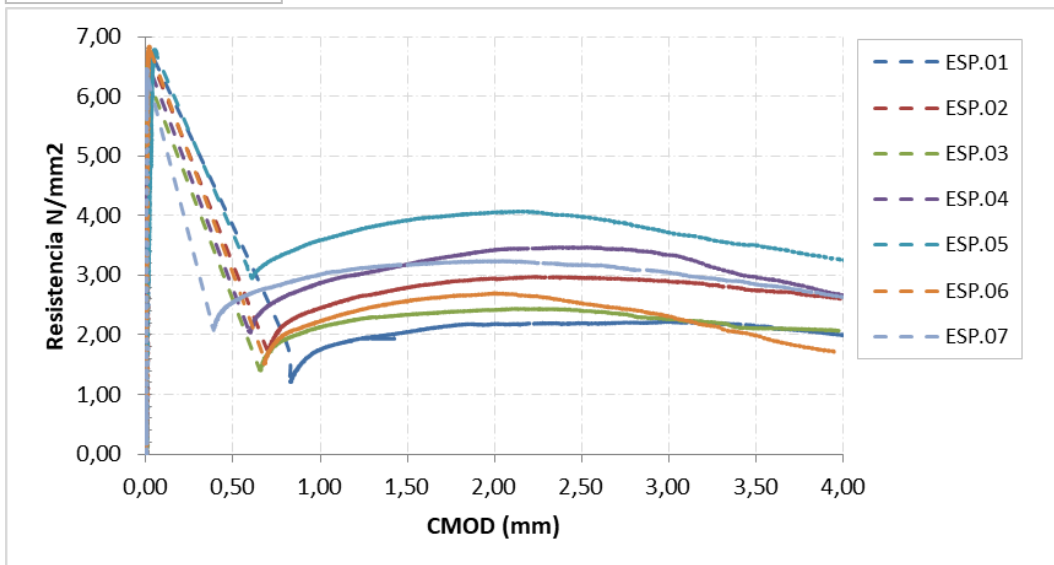


Figura 31 Resultados de ensayos a flexotracción, temperatura de conservación -15 °C PF1-N

-15 °C SF1-P

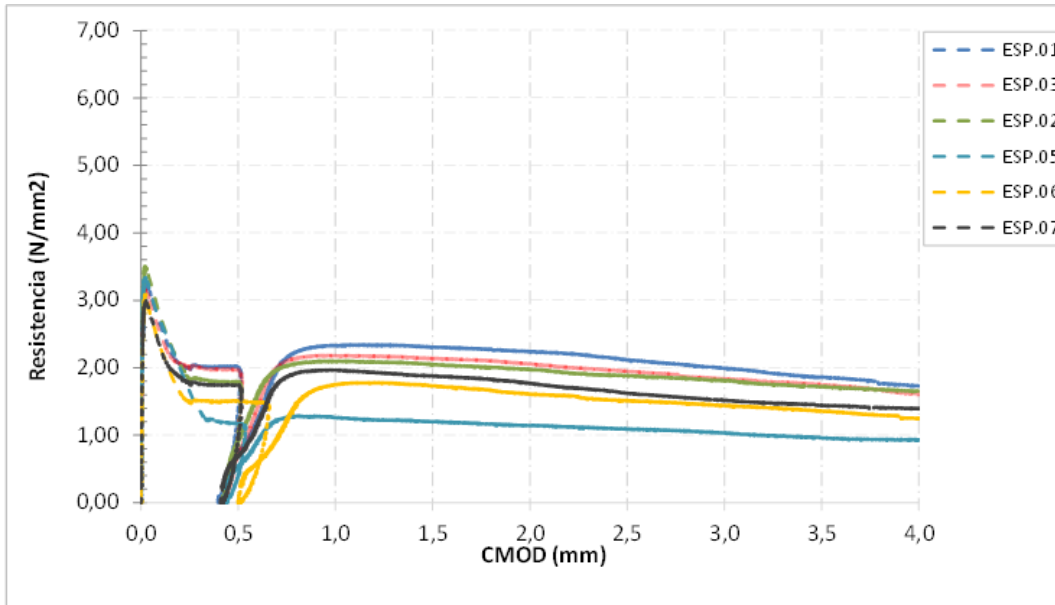


Figura 32 Resultados de ensayos a flexotracción, temperatura de conservación -15 °C SF1-P

-15 °C SF1-N

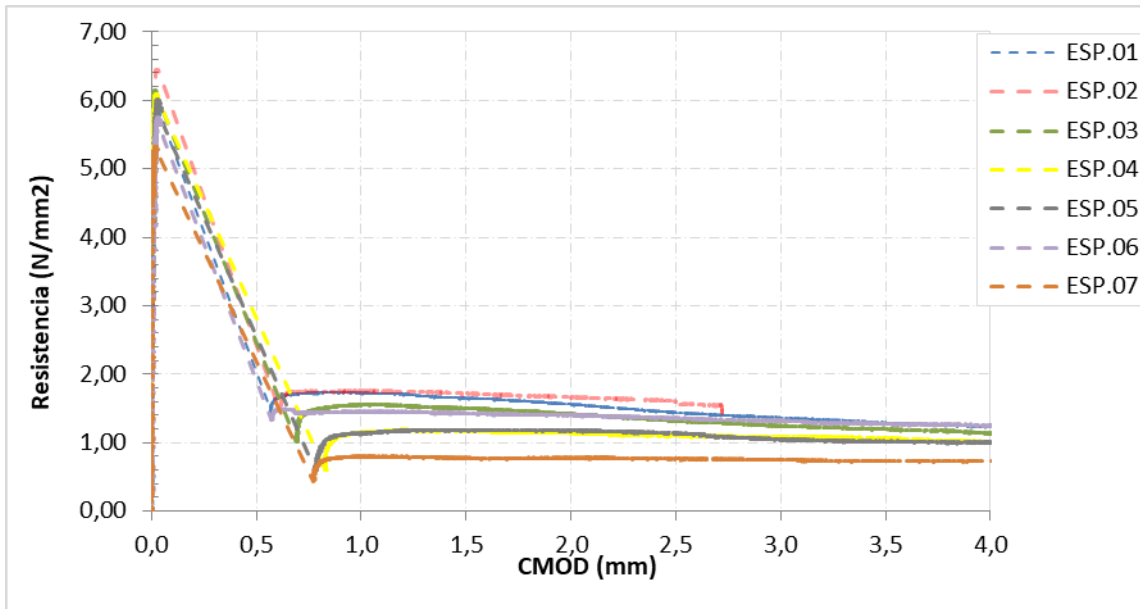


Figura 33 Resultados de ensayos a flexotracción, temperatura de conservación -15 °C SF1-N

Tabla 14 Resultados de (F_{LOP}) obtenidos en las series ensayadas a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ SNFRC y SFRC.

Amasada #	Tipo de fibra	Condición	Temp. $^{\circ}\text{C}$	Curado en cámara /días	F_{LOP} (MPa)	DS (MPa)
1	PF	P	20	28	3,45	0,22
1	PF	N	-15	28	6,63	0,16
5	SF	P	20	28	3,22	0,18
5	SF	N	-15	28	5,96	0,36

Con una longitud promedio de las probetas analizadas de $l = 500\text{ mm}$, una base de $b = 150\text{ mm}$ y un $h_{sp} = 130\text{ mm}$, se obtuvieron los valores característicos de las resistencias residuales para cada uno de los desplazamientos estudiados.

Para el SNFRC sometido a temperatura de -15°C en condición PF1-P el (F_{LOP}) ensayado a temperatura ambiente en las muestras pre-fisuradas representa un 6,57% respecto a las SF-P ensayadas bajo la misma condición. Ver Tabla 14. Este comportamiento se debe a que las probetas en esta primera etapa del ensayo no se someten a las condiciones previstas, es decir, están a temperatura ambiente.

Bajo las condiciones no pre-fisuradas ver Figura 31 y Figura 33 para ambos estados de temperatura, el SNFRC poseen un ligero aumento en el (F_{LOP}), el cual podría atribuirse a una mayor adherencia de las fibras poliméricas a la matriz del hormigón respecto al SFRC.

Tabla 15 Resultados de fr_1 , fr_3 obtenidos en las series ensayadas a $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ SNFRC y SFRC.

Amasada #	Tipo de fibra	Condición n	Temp. $^{\circ}\text{C}$ (fr_1/fr_3)	Curado en cámara / días	fr_1 (MPa)	DS fr_1 (MPa)	fr_3 (MPa)	DS fr_3 (MPa)
1	PF	P	20 / -15	28	1,76	0,34	3,18	0,69
1	PF	N	-15	28	2,08	0,60	2,96	0,64
5	SF	P	20 / -15	28	1,74	0,34	1,73	0,40
5	SF	N	-15	28	0,98	0,44	1,25	0,64

De acuerdo a la Tabla 15 que representa las resistencias residuales obtenidas a temperatura de $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, se verifica que para un $\text{CMOD} = 0,5\text{ mm}$, el SNFRC arrojó una resistencia (fr_1) de 1,76 MPa, desviación estándar de 0,34 MPa, bajo la condición PF-P, sin embargo para la condición PF-N se obtuvo un valor de 2,08 MPa, desviación estándar de 0,60 MPa. En el

SFRC se determinaron resistencias (f_{r1}) de 1,74 MPa, desviación estándar de 0,34 MPa para la condición SF-P y de 0,98MPa, desviación estándar de 0,44 MPa para la condición no pre-fisurada. Datos que poseen cierta similitud en condiciones de pre-fisurado, sin embargo, para los valores de no pre-fisurado se presenta lo contrario, se puede verificar que el SNFRC posee mejor comportamiento que el SFRC representando un 52,95 % en promedio más de resistencia (f_{r1}) respecto al SFRC.

Pasando a un $CMOD= 2,5mm$ en el SNFRC se obtuvo una resistencia residual (f_{r3}) promedio de 3,18 MPa, desviación estándar de 0,69 MPa bajo la condición PF-P, en cambio, para el SFRC bajo las mismas condiciones de ensayo se logró una resistencia promedio de 1,73 MPa, desviación estándar de 0,40 MPa. Con estos datos obtenidos se verifica que la resistencia residual (f_{r3}) en el SNFRC representa un 45,42% más alto que el SFRC, agregando a esto un mejor comportamiento frente a la rotura.

Respecto a la condición no pre-fisurada el SNFRC presenta valores más elevados de resistencia que el SFRC, este comportamiento podría ser como se ha mencionado en otras ocasiones gracias a la unión que se da entre la matriz del hormigón y las fibras, mientras más baja es la temperatura mejor comportamiento se observa en el SNFRC.

Desde un punto de vista general y de acuerdo a las gráficas obtenidas la adición de fibras muestra un modo de falla dúctil en las series con pre-fisura, como se esperaba a pesar del factor temperatura. Esto es atribuido a la capacidad de las fibras para distribuir tensiones, ralentizar el proceso de fisuración y propagación de las mismas. Sin embargo, las series sin pre-fisuración, ensayadas en su totalidad a $-15^{\circ}C$, presentan una aparición de la fisura con una caída de carga más pronunciada y un comportamiento fragilizado.

Es importante tener en cuenta que después de aparecer la primera fisura, el comportamiento del hormigón va a depender del tipo de fibra, se verifica que las fibras poliméricas son más efectivas en el comportamiento posterior a la fisuración, registrándose resultados más altos para valores más altos de $CMOD$.

Desde un punto de vista general, la temperatura de estudio $-15^{\circ}C$, afecta de forma significativa al límite de proporcionalidad, probablemente por efectos en la matriz, y se ha detectado un cierto efecto en la resistencia residual f_{r1} .

4.3.3 Ensayo a flexotracción a 20 °C. (PF1-P, PF1-N, SF1-P y SF1-N)

Los ensayos de flexotracción a 20 °C se consideraron como pruebas a temperatura ambiente, aquí se evaluaron 7 muestras diferentes por condición de fisuración de la probeta y tipo de fibra; estos ensayos se realizaron con la finalidad de tener una mejor representación de los resultados y poder realizar comparaciones más representativas entre las diferentes condiciones. Estas pruebas se llevaron a cabo luego de las probetas haber cumplido los 28 días en cámara de curado y 3 días de exposición a temperatura ambiente.

Las probetas fueron sometidas al ensayo de flexotracción contenido en la norma UNE-EN 14651 con el objetivo de determinar el límite de proporcionalidad elástico (F_{LOP}), y sus resistencias residuales más representativas (fr_1 y fr_3).

Este ensayo se realizó en dos fases: la primera fase consistió en una pre-fisuración de la muestra a temperatura ambiente tal y como se detalla en el capítulo III; se aplicó una carga constante hasta alcanzar un $CMOD = 0,5mm$, posteriormente se mantuvieron las probetas a temperatura ambiente 20 °C y por último, una segunda fase que consistió en continuar el ensayo con los mismos parámetros de la primera fase pero a temperatura del cuarto.

Una vez ocurre la primera fisura las fibras inician su contribución en el comportamiento mecánico del hormigón e inicia el proceso de transferencia de carga a las fibras, se genera un aporte de resistencia post-fisuración de la muestra debido a la adherencia de las fibras a la matriz del hormigón.

Por lo tanto, luego de haber aparecido la primera fisura, la carga necesaria para aumentar el $CMOD$ va disminuyendo hasta alcanzar el valor mínimo asociado con la disminución de la rigidez debido a la fisuración.

Las gráficas resistencia vs $CMOD$ ilustrados en la Figura 34 y Figura 36, para la condición de PF1-P y SF1-P han sido elaborados a partir de los resultados obtenidos de las muestras ensayadas, se verifica en la condición PF1-P una ganancia de resistencia respecto a las SF1-P, esta ventaja podría atribuirse a la cantidad de fibras por kg/m^3 .

Con las muestras no pre-fisuradas Figura 35 y Figura 37 los ensayos se realizan en una sola fase. Se ensaya la muestra hasta alcanzar un $CMOD = 4mm$ sin interrumpir el proceso,

luego se calculan los parámetros correspondientes. Se puede observar similitud en las gráficas obtenidas bajo esta condición de no pre-fisuración, no se verifica variación significativa a considerar.

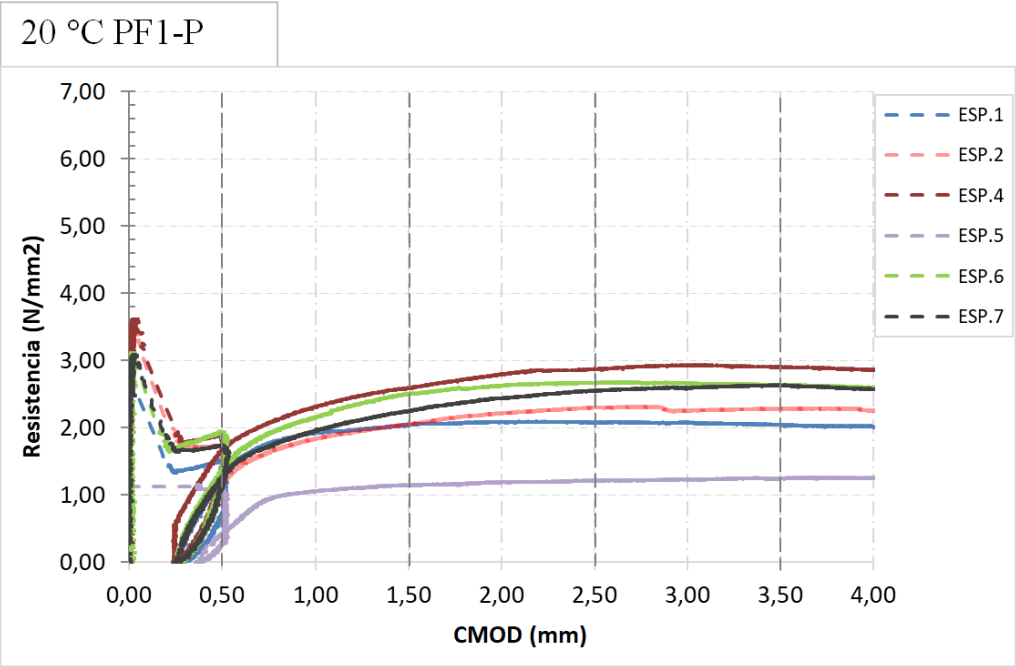


Figura 34 Resultados de ensayos flexotracción, temperatura de ensayo 20 °C. PF1-P

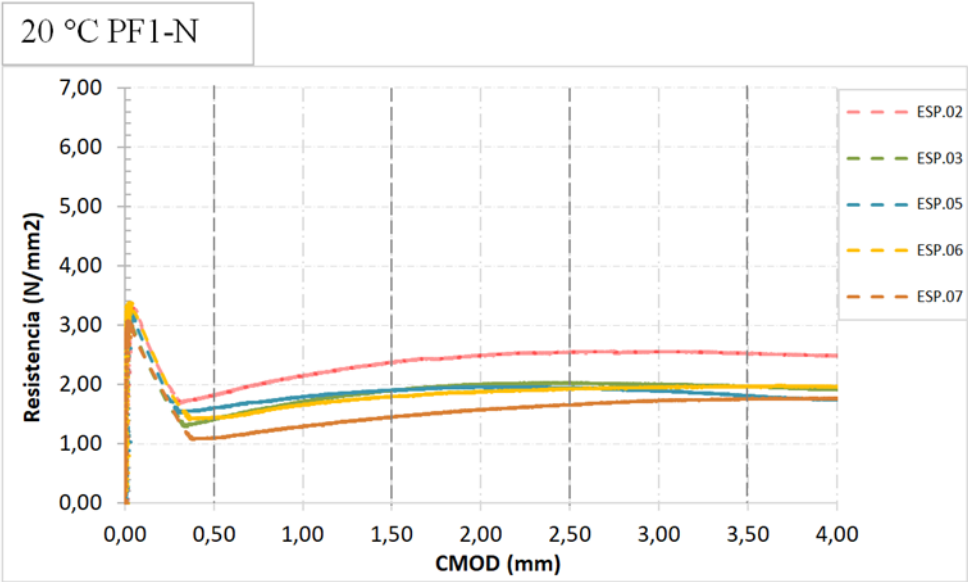


Figura 35 Resultados de ensayos flexotracción, temperatura de ensayo 20 °C. PF1-N

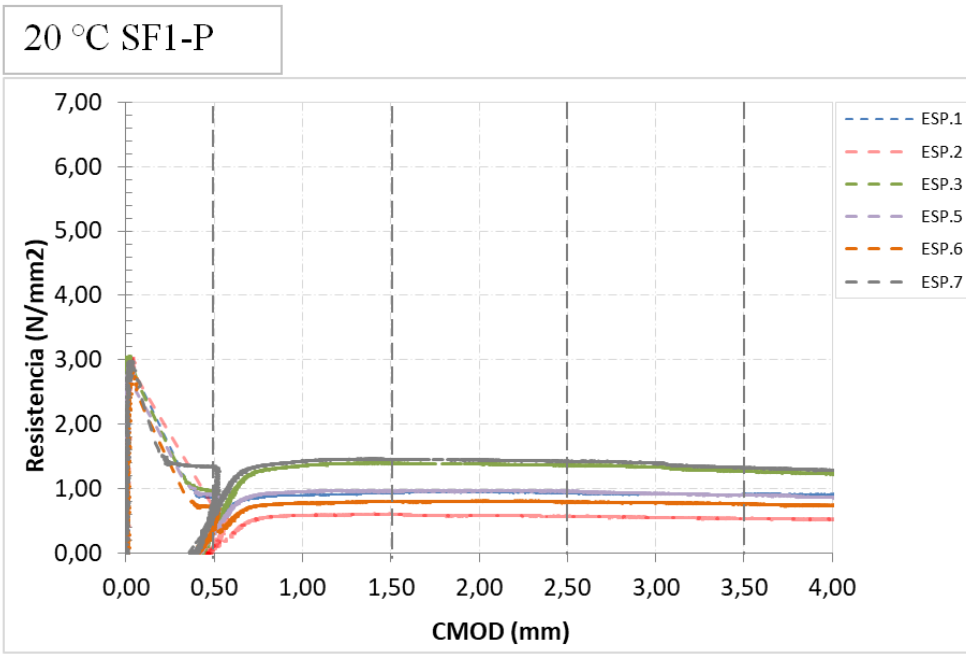


Figura 36 Resultados de ensayos flexotracción, temperatura de ensayo 20 °C. SF1-P

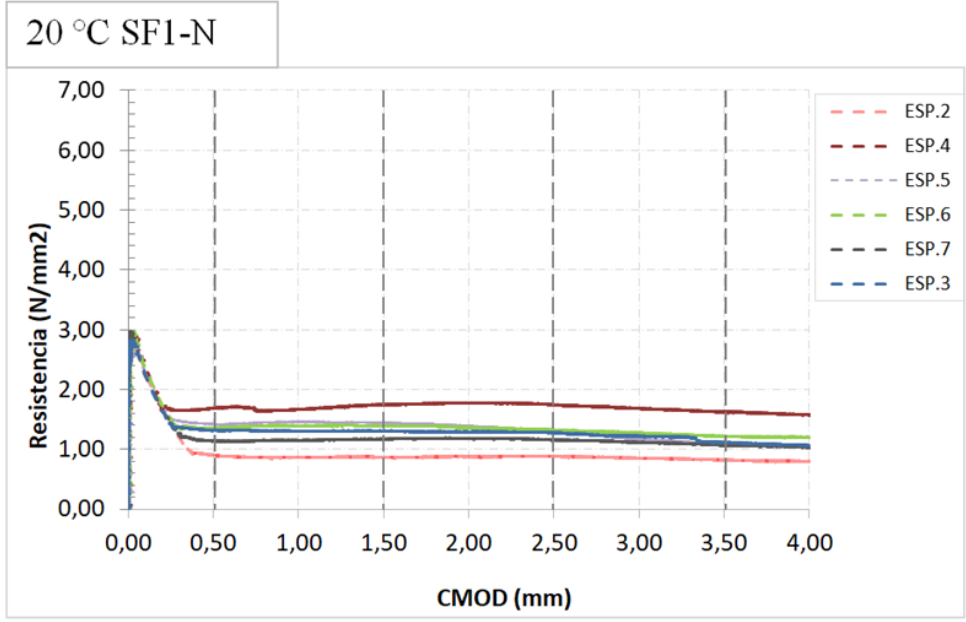


Figura 37 Resultados de ensayos flexotracción, temperatura de ensayo 20 °C. SF1-N

Tabla 16 Resultados de (F_{LOP}) obtenidos en las series ensayadas a 20 °C SNFRC y SFRC

Amasada #	Tipo de fibra	Condición	Temp. °C.	Curado en cámara/ días	F_{LOP} (MPa)	DS (MPa)
3	PF	P	20	28	3,22	0,28
3	PF	N	20	28	3,21	0,13
4	SF	P	20	28	2,98	0,07
4	SF	N	20	28	2,90	0,08

Con una longitud promedio de las probetas analizadas de $l = 500$ mm, una base de $b = 150$ mm y un $h_{sp} = 131,35$ mm, podemos obtener los valores característicos de las resistencias residuales para cada uno de los desplazamientos obtenidos.

Para el SNFRC de acuerdo a la Tabla 16 a temperatura de 20 °C en condición PF1-P el (F_{LOP}) presenta una variación de un 7,56% de resistencia para las SNFRC respecto al SFRC bajo las mismas condiciones. Esta reducida variación de resistencia se debe a que las probetas en esta primera etapa están todas bajo la misma condición de temperatura, es decir, a temperatura ambiente. Ver Figura 34 y Figura 36 donde se muestran estos comportamientos.

Algo similar ocurre con las condiciones no pre-fisuradas para ambos estados de temperatura (20 °C), aunque los valores del SNFRC poseen un ligero aumento de un 9,71% del (F_{LOP}) respecto a las SFRC, este reducido aumento de resistencia podría atribuirse a una mejor adherencia de las fibras poliméricas a la matriz del hormigón respecto a las fibras de acero, otro factor importante a considerar es la cantidad en kg/m^3 de fibras.

Tabla 17 Resultado de fr_1 y fr_3 obtenida en los ensayos a 20 °C SNFRC y SFRC

Amasada #	Tipo de fibra	Condición	Temp. °C	Curado en cámara / días	fr_1 (MPa)	DS fr_1 (MPa)	fr_3 (MPa)	DS fr_3 (MPa)
3	PF	P	20	28	1,63	0,31	2,28	0,60
3	PF	N	20	28	1,47	0,27	2,02	0,32
4	SF	P	20	28	0,90	0,25	1,01	0,33
4	SF	N	20	28	1,30	0,28	1,28	0,36

De acuerdo a la Tabla 17 para un $CMOD= 0,5$ mm, el SNFRC se obtuvo una resistencia residual promedio (fr_1) de 1,63 MPa, desviación estándar 0,31 MPa para la condición PF1-P, sin embargo, para SFRC se obtuvo una resistencia (fr_1) promedio de 0,90 MPa, desviación estándar de 0,25 MPa bajo condiciones SF1-P, es decir, el SNFRC representa un 44,92 % de resistencia mayor que el SFRC en condiciones similares de temperatura y en estado pre-fisurado. Para la condición de no pre-fisurada, se obtuvieron para las PF1-N una resistencia residual promedio (fr_1) igual a 1,47 MPa, desviación estándar 0,27MPa y para las SF1-N 1,30 MPa, desviación estándar de 0,28 MPa correspondiente a un 11,56% de resistencia para el PF1-N respecto al SF-N durante esta fase del ensayo.

Pasando a un $CMOD= 2,5$ mm para la condición PF1-P se obtuvo una resistencia residual promedio (fr_3) de 2,28 MPa, desviación estándar de 0,60 MPa en cambio, para el SF1-P bajo las mismas condiciones de ensayo se observa una resistencia residual promedio de 1,01 MPa, desviación estándar de 0,33 MPa diferencia que equivale a una ganancia de resistencia de 55,70% para el PF1-P, respecto al SF1-P, agregando a esto un mejor comportamiento frente a la rotura. Este acontecimiento al igual que los anteriores podría ser debido a la cantidad de kg/m^3 de fibras y a la adherencia de ambos materiales bajo las condiciones de temperatura estudiadas.

Respecto a la condición no pre-fisurada el PF1-N continúa presentando valores más elevados de resistencia que el SF1-N bajo esta condición.

4.3.4 Ensayo a flexotracción a 60 °C. (PF1-P PF1-N y SF1 P SF1 N)

En la temperatura de 60 °C, se evaluaron 28 probetas prismáticas: 14 con fibras poliméricas y 14 con fibras de acero bajo las condiciones pre-fisurada y no pre-fisurada, de esta manera se logró evaluar su comportamiento frente a la temperatura de 60 °C. Las muestras luego de 28 días en cámara de curado, se procedió a colocarlas dentro de los depósitos de hormigón llevados a temperatura de 60 °C por un periodo de 3 días.

Posterior a su conservación se sometieron al ensayo de flexotracción contenido en la norma UNE-EN 14651, el cual tiene como finalidad determinar límite de proporcionalidad (F_{LOP}) y sus principales resistencias residuales (fr_1 y fr_3) respectivamente.

Para las series con pre-fisura (PF1-P y SF1-P), el procedimiento consistió en ensayar las probetas en dos fases: fase 1) se pre-fisuraron las probetas a temperatura ambiente mediante la aplicación de una carga constante hasta llegar a un $CMOD = 0,5mm$, posterior a la pre-fisuración son desmontadas del ensayo e introducidas en los depósitos que contienen la temperatura de estudio, en este caso $60^{\circ}C$.; fase 2) se extraen las probetas luego de haber concurrido los 3 días sumergidas en los depósitos a la temperatura estudiada bajo las condiciones pre-fisuradas y no pre-fisuradas, dándole continuidad al procedimiento pero en esta ocasión conservando la temperatura de estudio.

Cuando ocurre la primera fisura las fibras inician su contribución en el comportamiento mecánico de las probetas y el hormigón comienza a transferir las cargas a las fibras las cuales resisten la fisuración debido a su adherencia a la matriz de hormigón.

Luego de haber aparecido la primera fisura, la carga necesaria para aumentar el $CMOD$ va disminuyendo hasta alcanzar el valor mínimo el cual se asocia con la disminución de la rigidez debido a la fisuración.

Las gráficas de resistencia vs $CMOD$ mostradas en las Figura 38 y Figura 40 elaboradas a partir de los resultados de las muestras ensayadas reflejan aspectos diferentes a considerar, todas bajo la condición de pre-fisuración para esta temperatura de ensayo. Las probetas en condición PF1-P Figura 38 arrojaron un comportamiento más estable y regular en sus resistencias residuales y límite de proporcionalidad elástico, sin embargo, las SF1-P no reflejan esta ventaja, se verifica uniformidad y cambios bruscos en las probetas ensayadas, cambios no beneficios para el diseño de elementos estructurales.

En las series sin pre-fisura (PF1-N y SF1-N), el ensayo de resistencia a flexotracción se realiza en una sola fase, conservando la temperatura de ensayo mediante cobertores y aisladores térmicos, aplicando una carga constante a las probetas hasta alcanzar un $CMOD = 4mm$. Las curvas tensión- $CMOD$ se muestran en Figura 39 y Figura 41. Tras el ensayo, se procedió a calcular el límite de proporcionalidad elástico (F_{LOP}) y las resistencias residuales estudiadas (fr_1 y fr_3).

Bajo esta condición de no pre-figuración las probetas arrojaron comportamientos similares, tanto para las PF1-N como para el SF1-N, no se verifica variación considerable

en el (F_{LOP}), ni después de la fisuración que es cuando las fibras empiezan a aportar resistencia a las probetas de estudio.

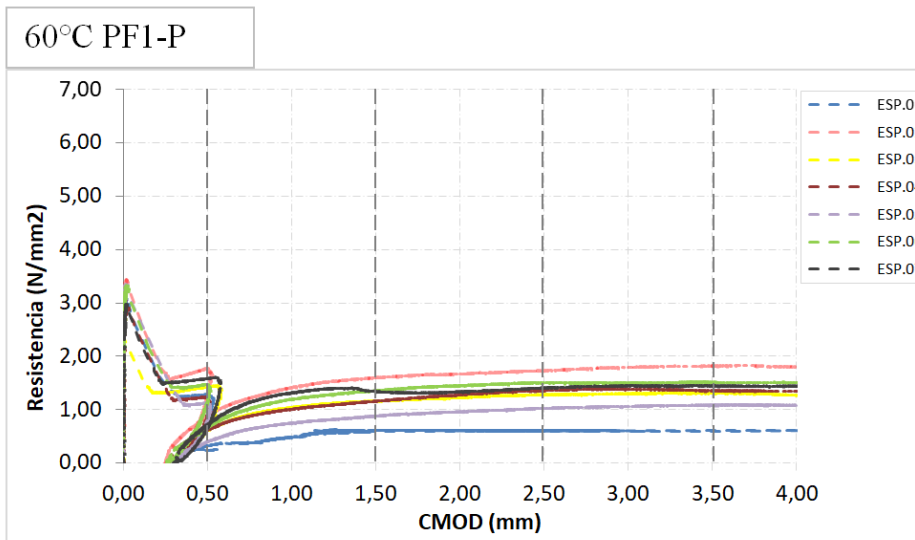


Figura 38 Resultados de ensayos flexotracción, temperatura de ensayo 60 °C. PF1-P

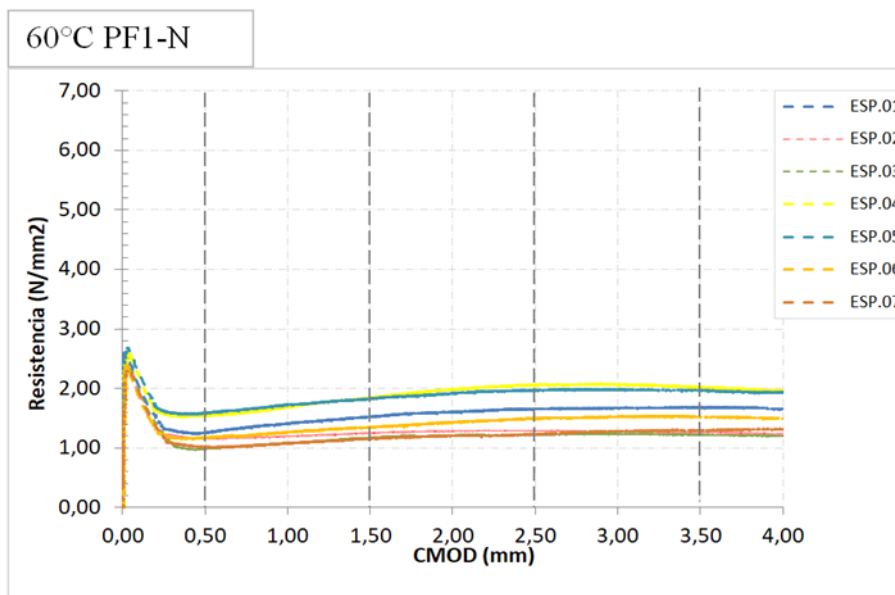


Figura 39 Representación gráfica resultados de ensayos flexotracción, temperatura de ensayo 60 °C. PF1-N

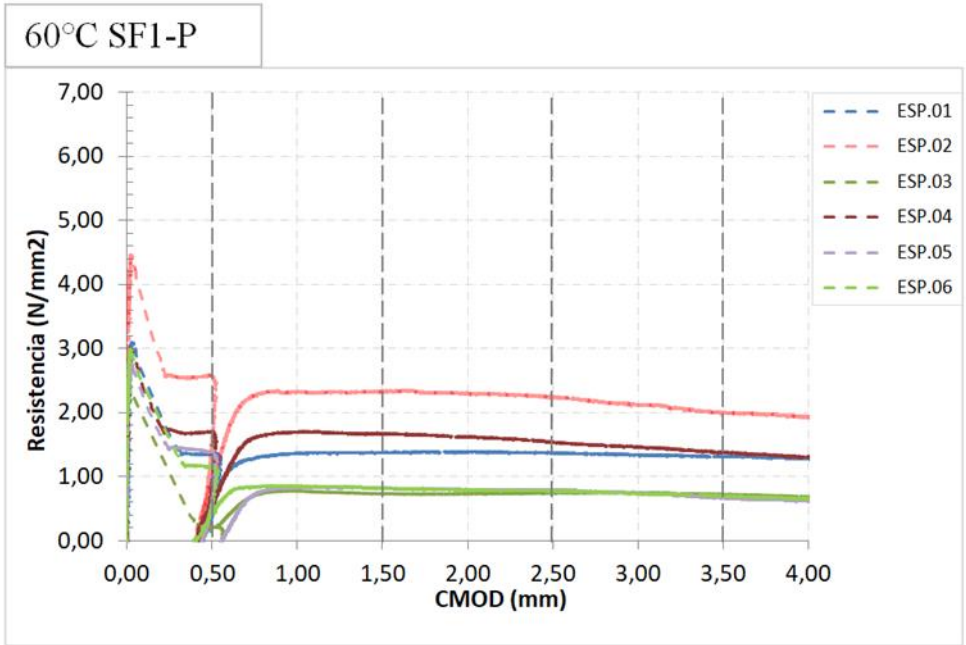


Figura 40 Representación gráfica resultados de ensayos flexotracción, temperatura de ensayo 60 °C. PF1-P

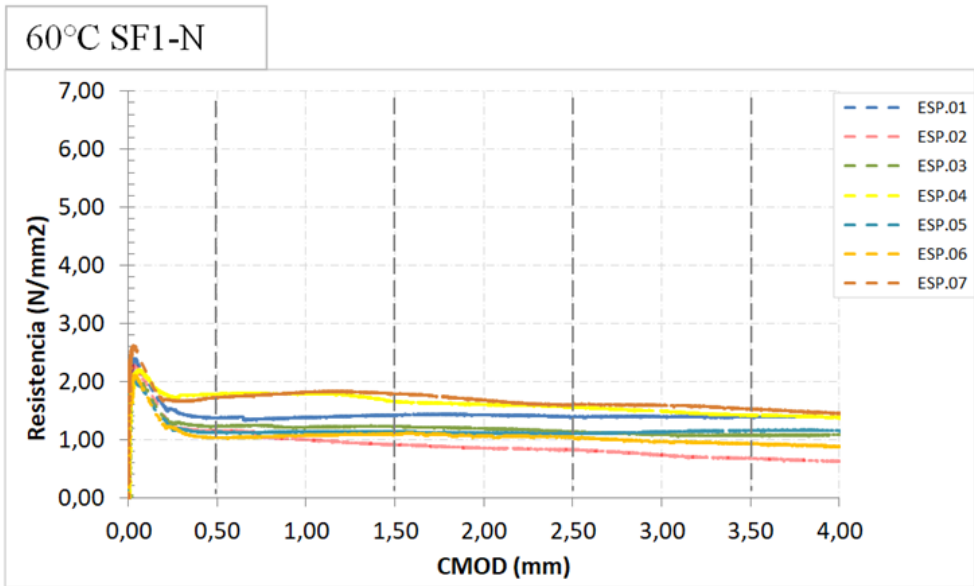


Figura 41 Representación gráfica resultados de ensayos flexotracción, temperatura de ensayo 60 °C. PF1-N

Tabla 18 Resultados de (F_{LOP}) obtenidos en las series ensayadas a 60 °C SNFRC y SFRC

Amasada #	Tipo de fibra	Condición	Temp. °C	Curado en cámara / días	F_{LOP} (MPa)	DS (MPa)
7	PF	P	20	28	3,17	0,20
7	PF	N	60	28	2,46	0,15
10	SF	P	20	28	3,12	0,70
10	SF	N	60	28	2,25	0,20

Con una longitud promedio de las probetas analizadas de $l = 500$ mm, una base de $b = 150$ mm y un $h_{sp} = 130$ mm, podemos obtener los valores característicos de las resistencias residuales para cada uno de los desplazamientos obtenidos.

De acuerdo a la Tabla 18 para el SNFRC a la temperatura de estudio 60 °C en condición PF1-P el (F_{LOP}) no presenta diferencias considerables respecto al SFRC en condición SF1-P. Este comportamiento se debe a que las probetas en esta primera etapa están todas bajo las mismas condiciones de temperatura, es decir, a temperatura ambiente.

Para las condiciones no pre-fisurada no existen diferencias significativas, en el SNFRC se obtuvo un (F_{LOP}) igual 3,17 MPa, desviación estándar de 0,20 MPa para las PF-P, en cambio, para el SFRC arrojó 3,12 MPa, desviación estándar de 0,70 MPa, bajo la condición SF-P, esto equivale a un 1,35% de diferencia en su resistencia, variación no representativa debido a la existencia de dispersiones en los ensayos.

En la Tabla 19 se observa que para un $CMOD = 0,5$ mm, el SFNRC obtuvo una resistencia residual promedio (f_{r1}) de 1,41 MPa, desviación estándar de 0,23 MPa para la condición PF1-P, sin embargo, para SFRC se obtuvo una resistencia promedio de 1,40 MPa, desviación estándar de 0,77 MPa, bajo condiciones SF1-P, es decir, los valores son similares en condiciones de pre-fisurado bajo la temperatura de 60°C. Otra similitud se verifica en las condiciones de no pre-fisurada, donde se obtuvieron resultados similares y con poca variación.

Tabla 19 Resultados de fr_1 y fr_3 obtenidos en las series ensayadas a 60 °C SNFRC y SFRC

Amasada #	Tipo de fibra	Condición	Temp. °C (fr ₁ / fr ₃)	Curado en cámara / días	fr ₁ (MPa)	DS (fr ₁) (MPa)	fr ₃ (MPa)	DS (fr ₃) (MPa)
7	PF	P	20 / 60	28	1,41	0,23	1,27	0,36
7	PF	N	60	28	1,24	0,24	1,56	0,35
10	SF	P	20 / 60	28	1,40	0,77	1,24	0,59
10	SF	N	60	28	1,34	0,30	1,23	0,29

Pasando a un CMOD= 2,5mm para las SFNRC se obtuvo una resistencia (fr_3) promedio de 1,27 MPa, desviación estándar de 0,36 MPa bajo la condición de PF-P, para el SFRC bajo las mismas condiciones de ensayo obtuvimos una resistencia promedio de 1,24 MPa, desviación estándar de 0,59 MPa, la resistencia del SNFRC no presentan diferencias considerables para este ensayo bajo la condición de pre-fisurado. Este comportamiento podría ser a causa del módulo de elasticidad de ambos materiales y la relación en contenido de fibras de acero respecto a las fibras poliméricas.

Respecto a las condición no pre-fisurada el SNFRC presenta valores a considerar, la condición PF1-N (fr_3) es igual 1,56 MPa, desviación estándar de 0,35 MPa, sin embargo, para la condición SF1-N arrojo un valor de 1,23 MPa, desviación estándar de 0,29 MPa, lo que equivale a un 20,85% de resistencia a favor para las PF1-N respecto a las SF1-N, como se ha mencionado en otras ocasiones, este comportamiento podría ser gracias a la unión que se da entre la matriz del hormigón y las fibras, teniendo las fibras poliméricas una mejor adherencia y un contenido de fibras en kg/m^3 más elevado que las de acero.

Desde un punto de vista general, la temperatura de estudio 60°C, no afecta en gran medida las resistencias residuales, teniendo un efecto más acusado en el límite de proporcionalidad elástico, que puede estar causado por efectos en la matriz más que por efectos en las fibras.

4.3.5 Análisis de condiciones pre-fisuradas y no pre-fisuradas a temperaturas (-15°C, 20°C y 60°C).

PFN y SFN (-15°C, 20°C y 60°C)

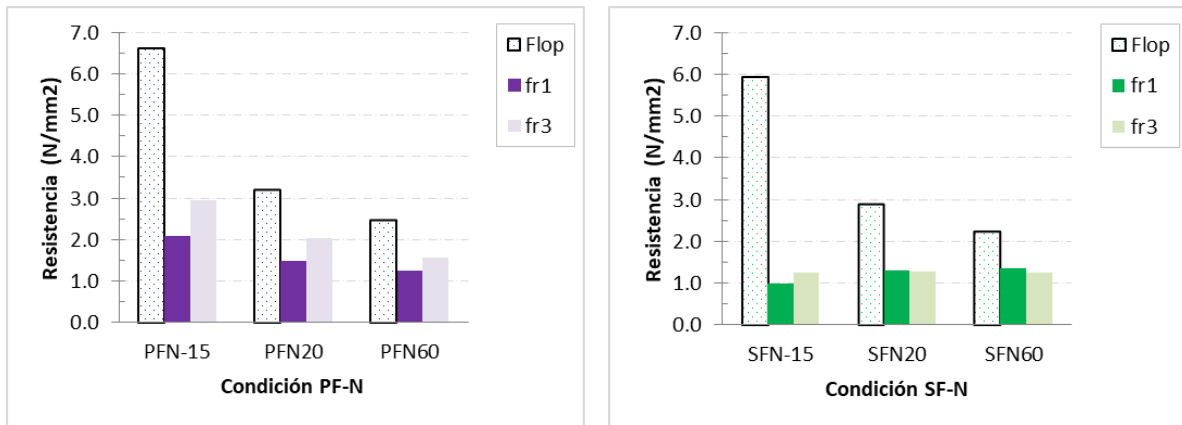


Figura 42 Comparación F_{LOP} , fr_1 y fr_3 respectivamente, PF1/SF1 - 15 °C

De acuerdo a la Figura 42 los valores de (F_{LOP}) para las muestras no pre-fisuradas PF1-N bajo la temperatura de -15°C representan un 10,16% en promedio de resistencia mayor que las no pre-fisuradas en SF1-N; para la temperatura de 20°C las PF1-N representan un aumento de resistencia 9,71% respecto a las SF1-N bajo las mismas condiciones de temperatura, sin embargo, para la temperatura de 60 °C el (F_{LOP}) en las SF1-N representa una disminución de la resistencia promedio respecto a las PF1-N equivalente a un 8,67%.

Los valores de (fr_1) y (fr_3) para las PF1-N disminuyen considerablemente de acuerdo va aumentando la temperatura. Se verifica que desde -15°C hasta 20°C en las PF1-N se observa una reducción de un 29,25% de las resistencias residuales en promedio, en cambio, para el para el rango de temperatura que va desde 20°C hasta 60°C la pérdida de resistencia es de sólo un 15,50%.

La resistencia residual (fr_1) para el SF1-N bajo las muestras no pre-fisuradas en el rango de temperatura que va desde -15°C hasta 20°C, refleja un ligero aumento equivalente a un 24,82%, en cambio, para las temperaturas de 20 °C y 60°C esta resistencia se mantiene constante y no se verifica variación alguna. Para (fr_3) bajo esta condición de SF1-N no se registra variación de la resistencia, ver Figura 42.

PF1P, PF1N, SF1P y SF1N a 20 °C

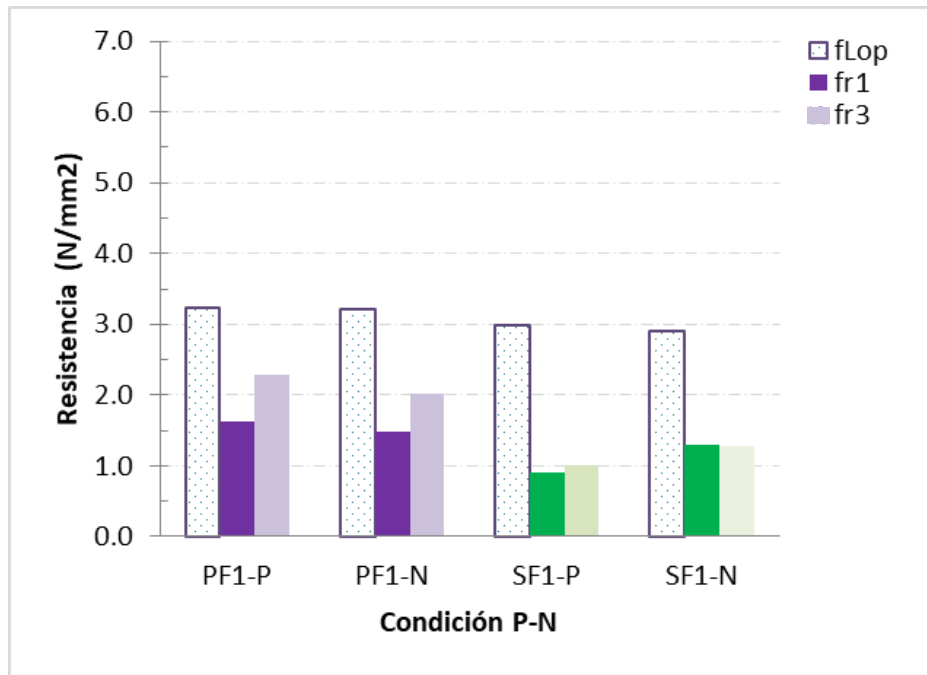


Figura 43 Comparación F_{LOP} , fr_1 y fr_3 respectivamente. PF1/SF1 - 20 °C

En la Figura 43 los valores de límite de proporcionalidad elástica (F_{LOP}) para las muestras no pre-fisuradas y pre-fisuradas arrojan resultados similares para ambos tipos de hormigones reforzados con fibras, este comportamiento se esperaba debido a que las probetas están bajo las mismas condiciones de temperatura, es decir, a temperatura ambiente durante esta etapa. En cambio, la resistencia residual (fr_1) disminuye de acuerdo al tipo de fibra contenido en el hormigón, las (fr_1) de PF1-P y PF1-N poseen mayor resistencia que las SF1-P y las SF1-N. Las resistencias residuales (fr_3) a temperatura ambiente, son mayores para el SNFRC respecto al SFRC, representan un aumento de resistencia promedio de 55,71%, es decir, el tipo de fibra y la cantidad son valores influyentes en esta resistencia residual bajo estas condiciones de ensayo.

4.3.6 Evolución de parámetros (F_{LOP} , fr_1 y fr_3) respecto a la temperatura.

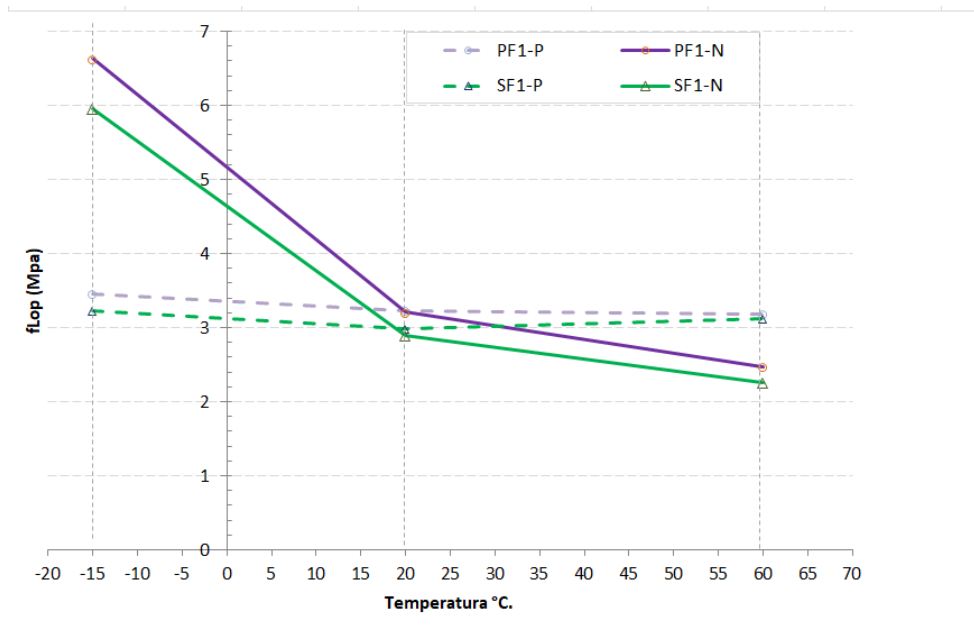


Figura 44 Evolución de (F_{LOP}) según la temperatura de las series.
(Series con pre-fisura, F_{LOP} ensayado a 20°C).

El (F_{LOP}) definido en la norma UNE-EN 14651 y es la tensión en el fondo de la entalla que se supone actúa en el caso de una distribución lineal de tensiones, en una sección no agrietada del centro de vano de un prisma sometido a una carga puntual F_L .

La Figura 44 muestra una comparación del (F_{LOP}) para el SNFRC y al SFRC, sometidos a temperaturas de ensayo bajo distintas condiciones de fisuración. Se observa que mientras disminuimos la temperatura el límite de proporcionalidad elástico (F_{LOP}) aumenta de manera proporcional, en cambio, cuando aumentamos la temperatura el (F_{LOP}) disminuye en mayor proporción para las condiciones no pre-fisuradas en ambos tipos de fibras respecto a las pre-fisuradas.

Este aumento del (F_{LOP}) previo a los 20°C para las condiciones PF1-N y SF1-N, se debe a la disminución de la temperatura, lo que genera un aumento del módulo elástico del hormigón, que puede estar debido a la congelación del agua libre y combinada de los componentes, posterior a este evento se crea una matriz más resistente de la pasta de hormigón, lo contrario ocurre con el aumento de la temperatura.

Para las condiciones de PF1-P y SF1-P, no existen variaciones significativas para las muestras pre-fisuradas en el (F_{LOP}), esto tiene sentido, las muestras se pre-fisuran a temperatura ambiente, aquí no debe existir variación alguna a considerar.

De acuerdo a (Rocco & Planas, 2013), mientras disminuimos la temperatura en el hormigón, este aumenta su resistencia, tanto el módulo de elasticidad como la energía de fractura aumenta considerablemente, pero su fragilidad aumenta bajo las mismas condiciones.

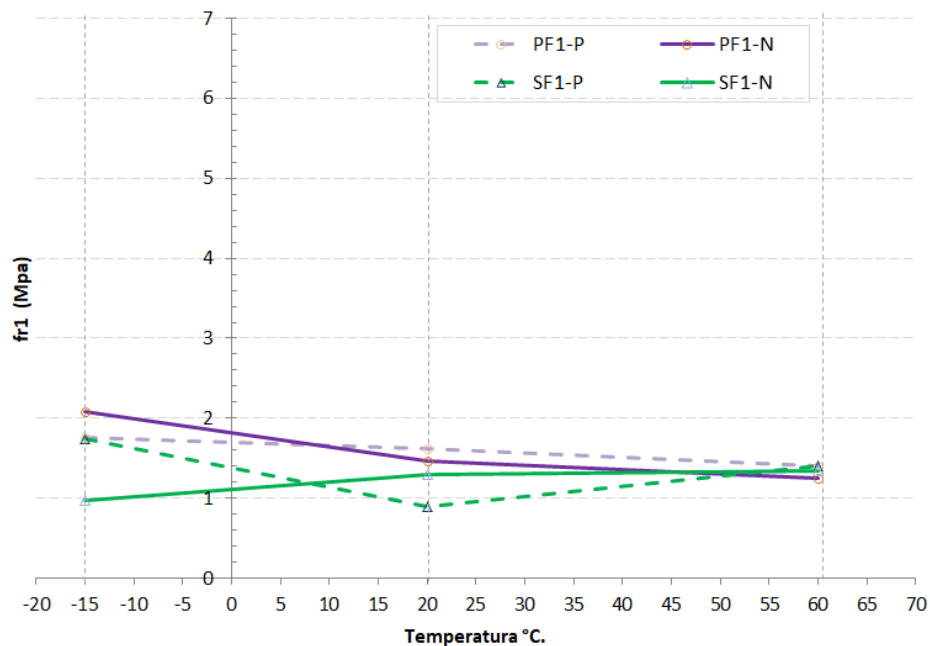


Figura 45 Evolución de fr_1 según la temperatura de las series.
(Series con pre-fisura, f_{r1} ensayado a 20°C).

La resistencia residual (fr_1) definida en la norma UNE-EN 14651 como la 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 de vano de un prisma sometido a una carga puntual, corresponde a un $CMOD_j$ donde $CMOD_j$ debe ser mayor que $CMOD_{FL}$. Se evaluó para un $CMOD_j = 0,5$. En la Figura 45 el eje de las x corresponde a las temperaturas de ensayo en °C y el eje de las y corresponde a la resistencia residual (fr_1) en (MPa).

La Figura 45 muestra el comportamiento respecto a la resistencia residual (fr_1) sometido condiciones pre-fisuradas y no pre-fisuradas, se observa que no existe variación

considerada y no tiene influencia significativa en el tipo de fibras a utilizada en este parámetro. Los valores de la resistencia residual (fr_1) para las muestras pre-fisuradas no presentan variación, esto ocurre debido a que el proceso de pre-fisuración se realiza a temperatura ambiente y no a temperatura de ensayo.

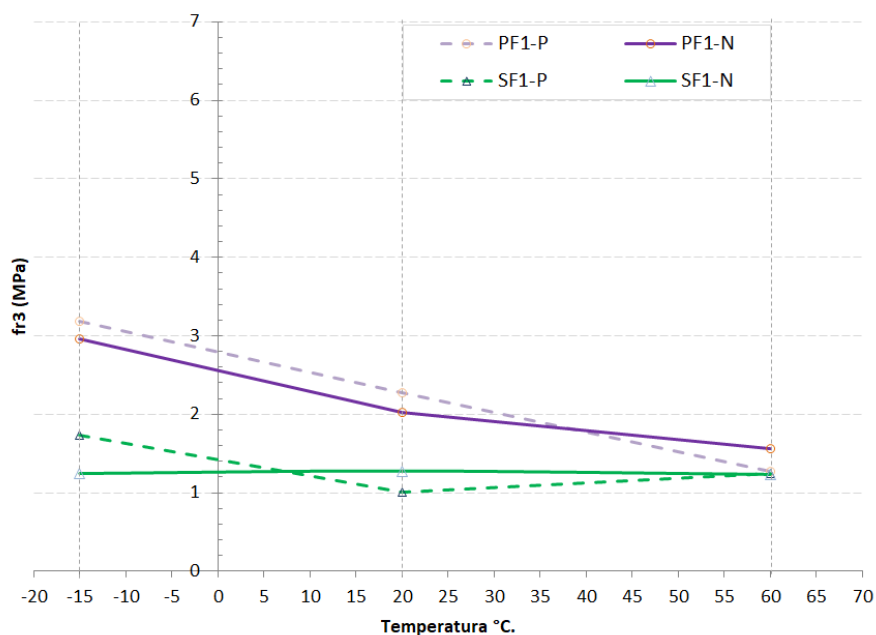


Figura 46 Evolución fr_3 según la temperatura de las series.
(Todas las series ensayadas a la temperatura correspondiente)

La resistencia residual (fr_3) definida en la norma UNE-EN 14651 como la 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 de vano de un prisma sometido a una carga puntual, correspondiente a un $CMOD= 2,5$ mm.

En la Figura 46 la resistencia residual (fr_3) aumenta de acuerdo disminuye la temperatura, este acontecimiento se da en las condiciones de no pre-fisurada sólo para el SNFRC, sin embargo, para temperaturas cálidas el efecto es contrario.

4.4 Discusión

Agregar fibras a la pasta de hormigón reduce su consistencia, tanto para el SFRC como para el SNFRC. De acuerdo a los estudios realizados por (Guerini et al., 2018) los ensayos de consistencia aplicados a la pasta de hormigón reforzado con macrofibras sintéticas presentaron un 15% menor respecto a las fibras de acero. Estos resultados reflejan cierta similitud con los obtenidos durante la campaña experimental realizada en este trabajo; el SNFRC representó un 8% más de consistencia respecto al SFRC, comportamiento que podría atribuirse a la diferencia entre el número de fibras por unidad de volumen, la superficie específica y otras características propias de cada macrofibra.

Si disminuimos la temperatura del hormigón este aumenta su resistencia y su módulo de elasticidad, de igual forma su energía de fractura aumenta proporcionalmente (Rocco & Planas, 2013). Un comportamiento similar fue observado en este trabajo en los ensayos de resistencia a flexotracción a -15°C , ya que se registró un aumento de resistencia y límite de proporcionalidad del material. Por lo tanto, las bajas temperaturas en el hormigón deben ser consideradas en los diseños estructurales.

Un aumento de temperatura en el hormigón provoca discontinuidad en la matriz del cemento de acuerdo a (Çavdar, 2013). Esta hipótesis se comprueba en los ensayos de resistencia a compresión realizados en este trabajo, ya que se verifica una reducción de 23,53% en promedio de su resistencia inicial, en el rango que oscila desde 20°C hasta 60°C en el SFRC. Esta reducción para el SNFRC es de sólo un 16%. (Buratti & Mazzotti, 2015) obtuvieron resultados en esta misma línea. Durante sus ensayos a flexotracción en probetas de hormigón reforzado con fibras poliméricas a temperaturas de (20°C y 40°C), registraron reducciones de hasta un 20% de su resistencia a flexotracción. Estas reducciones de resistencia, podrían ser debidas a la separación de los agregados de la matriz del cemento, generando discontinuidad en la pasta. En nuestros ensayos de resistencia a flexotracción a 60°C se obtuvieron reducciones de resistencias residuales (fr_3) de hasta un 15,50% bajo la condición no pre-fisurada en el SNFRC. Estos resultados son consistentes con las investigaciones de (Buratti & Mazzotti, 2015). Estos aumentos de temperatura, incluso en pequeñas variaciones pueden influir en gran medida a las deformaciones a largo plazo y en algunos casos conducir a fallas por fluencia en los elementos estructurales.

Vistos los últimos trabajos realizados por (Caballero-Jorna et al., 2021) sobre la influencia de las temperaturas moderadas en el comportamiento mecánico del hormigón reforzado con macrofibras sintéticas; no se presentan diferencias significativas en la degradación del SNFRC y el SFRC a temperaturas desde 5°C a 50°C durante 60 días de exposición, destacando que existe un mejor potencial de uso para el SNFRC que para el SFRC frente a estas temperaturas de estudio.

Pre-fisurar puede o no afectar el comportamiento mecánico del FRC de acuerdo a (Caballero-Jorna et al., 2021); en nuestro trabajo el efecto de pre-fisurar las muestras y someterlas a temperatura de estudio no presentó diferencias significativas a considerar en las resistencias residuales.

CAPÍTULO V- CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

5.1 Conclusiones

El trabajo de investigación ha presentado un estado del arte y unos primeros resultados sobre el comportamiento de hormigones reforzados con macrofibras sintéticas sometidos a temperaturas moderadas (-15°C, 20°C y 60°C). La metodología planteada, basada en la norma UNE-EN 14651, ha permitido realizar los ensayos a las temperaturas objetivo. Las conclusiones obtenidas en este estudio son las siguientes:

- La resistencia a compresión experimenta una subida importante cuando la temperatura desciende, independiente de la fibra empleada, reflejándose más en el SFRC. El efecto de la temperatura es más significativo a temperaturas por debajo de los 0°C, siendo la resistencia a compresión a -15 ° C un 30% superior a la obtenida a temperatura ambiente.
- La interacción de la temperatura con el estado pre-fisurado en la exposición a corto plazo a temperaturas moderadas no es un factor influyente para los FRC, ya que no existen diferencias notables entre elementos pre-fisurados y no pre-fisurados para cada tipo de FRC.
- En la temperatura de -15 ° C el límite de proporcionalidad (F_{LOP}) y las resistencias residuales (fr_1 y fr_3) aumentan hasta un 51,46% respecto a los valores correspondientes a la temperatura ambiente, aumentando también la fragilidad del hormigón.
- La influencia de temperaturas en el nivel de los 60 °C es evidente ya que disminuye, pero no en gran medida, el límite de proporcionalidad y las resistencias residuales en el FRC, comparado con los ensayos a temperatura ambiente.
- El descenso de las resistencias residuales presenta un efecto similar para ambos tipos de FRC estudiados, observándose una reducción más significativa para las (fr_3) de los SFRC que para el SNFRC.

5.2 Futuras líneas de investigación

Este trabajo abre nuevas preguntas y posibles líneas de investigación, dentro de las cuales detallamos las siguientes:

- Prolongar el periodo de conservación de las muestras a fin de tener una mejor comprensión del comportamiento del SNFRC a largo plazo bajo temperaturas moderadas.
- Aumentar el rango de temperatura de las muestras desde (-50 °C hasta 80 °C) con la finalidad de estudiar el comportamiento del SFNRC bajo condiciones más severas. En concreto, hay muy poca información respecto al comportamiento del SNFRC a temperaturas muy bajas.
- Modificar el contenido y la tipología de fibras poliméricas con el objetivo de ampliar el entendimiento del comportamiento de estas y otras fibras.

REFERENCIAS

- Adeyanju, A. A., & Manohar, K. (2011). Effects of Steel Fibers and Iron Filings on Thermal and Mechanical Properties of Concrete for Energy Storage Application. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 10(15), 1429–1448. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2011.1015111>
- Alberti, M. G., Enfedaque, A., & Picazo, A. (2020). *Materiales de Construcción, Vol 70, No 337 (2020)*. 70(337), 1–28.
- ASDFIL. (2019). *Durability assessment*.
- Buratti, N., & Mazzotti, C. (2015). Experimental tests on the effect of temperature on the long-term behaviour of macrosynthetic Fibre Reinforced Concretes. *Construction and Building Materials*, 95, 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.073>
- Caballero Jorna, M. (2018). Estudio de la influencia de temperaturas moderadas en el comportamiento de hormigones reforzados con macrofibras sintéticas. <http://hdl.handle.net/10251/113891>
- Caballero-Jorna, M., Roig-Flores, M., & Serna, P. (2021). An Experimental Study of the Influence of Moderate Temperatures on the Behavior of Macrosynthetic Fiber Reinforced Concrete. *RILEM Bookseries*, 30, 322–332. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58482-5_30
- Çavdar, A. (2013). The effects of high temperature on mechanical properties of cementitious composites reinforced with polymeric fibers. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.033>
- Comisión Permanente del Hormigón. (2008). Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008. *Boe N° 203*, 704.
- Di Prisco, M., Colombo, M., & Dozio, D. (2013). Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: Principles, models and test validation. *Structural Concrete*, 14(4), 342–361. <https://doi.org/10.1002/suco.201300021>
- Ding, Y., You, Z., & Jalali, S. (2011). The composite effect of steel fibres and stirrups on the shear behaviour of beams using self-consolidating concrete. *Engineering Structures*, 33(1), 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.023>
- E.R.K. Chandrathilaka, Shanaka Kristombu Baduge, P. M. (2020). Structural Applications of Synthetic Fibre Reinforced Cementitious Composites : A Review on 3 3 Material Properties , Fire Behaviour , Durability and 4 5 Structural Performance. *Construction and Building Materials*.
- Giaccio, R. Z. D. H. M. G. (2015). Creep behaviour of cracked steel and macro-synthetic fibre reinforced concrete. *Materials and Structures*. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0727-y>
- Granju, J. L., & Balouch, S. U. (2005). Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks. *Cement and Concrete Research*, 35(3), 572–577. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.032>

- Guerini, V., Conforti, A., Plizzari, G., & Kawashima, S. (2018). Influence of steel and macro-synthetic fibers on concrete properties. *Fibers*, 6(3), 1–14. <https://doi.org/10.3390/fib6030047>
- Khan, M., Rehman, A., & Ali, M. (2020). Efficiency of silica-fume content in plain and natural fiber reinforced concrete for concrete road. *Construction and Building Materials*, 244, 118382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118382>
- Kurtz, S., & Balaguru, P. (2000). Postcrack creep of polymeric fiber-reinforced concrete in flexure. *Cement and Concrete Research*, 30(2), 183–190. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00228-8)
- Mohammadhosseini, H., & Yatim, J. M. (2017). Microstructure and residual properties of green concrete composites incorporating waste carpet fibers and palm oil fuel ash at elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 144, 8–21. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.168>
- N. Sagre, E. Tonella, and I. J. (1998). EVALUATION OF THE STABILITY OF POLYPROPYLENE FIBERS IN ENVIRONMENTS AGGRESSIVE TO CEMENT-BASED MATERIALS. *Cement and Concrete Research*, 43(March), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00033-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00033-2)
- Pakravan, H. R., & Ozbakkaloglu, T. (2019). Synthetic fibers for cementitious composites: A critical and in-depth review of recent advances. *Construction and Building Materials*, 207, 491–518. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.078>
- Plizzari, G., & Serna, P. (2019). Structural effects of FRC creep. *Materials and Structures*, 51(6), 1–11. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1290-0>
- Rambo, D. A. S., Blanco, A., Figueiredo, A. D. de, Santos, E. R. F. dos, Toledo, R. D., & Gomes, O. da F. M. (2018). Study of temperature effect on macro-synthetic fiber reinforced concretes by means of Barcelona tests: An approach focused on tunnels assessment. *Construction and Building Materials*, 158, 443–453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.046>
- Richardson, A., & Ovington, R. (2017). Temperature related steel and synthetic fibre concrete performance. *Construction and Building Materials*, 153, 616–621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.101>
- Rocco, C., & Planas, J. (2013). Fracture properties of concrete under cryogenic conditions. *ECF13, San Sebastian ...*, 1–8. <http://www.gruppofrattura.it/ocs/index.php/esis/ECF13/paper/download/8513/4955>
- Seabrook, P. T., Balck, L. F., Bawa, K. S., Bortz, S. A., Chynoweth, G. L., Crom, T. R., Dikeou, J. T., Drudy, W. A., Fredericks, J. C., Glassgold, I. L., Henager, C. H., Heneghan, J., Kaden, R. A., Lanclos, J., & Litvin, A. (1984). State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Shotcrete. *Concrete International*, 6(12), 15–27.

APÉNDICE

AMASADA NO. 1 (-15 °C SNFRC)

 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	 ICITECH <small>CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN</small>	Fecha	7/9/2020
		Página	01
FICHA RESUMEN		Autor	Najaronny Castillo

Tamaño máximo nominal (mm)	20
Humedad de los áridos (%)	0.3
Peso húmedo (g)	650
Peso seco constante (g)	248.2
Peso del recipiente (g)	1037.2
Volumen de la mezcla (l)	80
Contenido de aire (%)	0.8
Tipo de fibra	MasterFiber 254
Aditivo	Sika 5980

Componentes	Dosificación 30/37 Mpa	Unidad
Grava 16/20 mm	183	kg/m3
Grava 8/16 mm	402	kg/m3
Grava 4/8 mm	146	kg/m3
Arena roja	897	kg/m3
Arena blanca	211	kg/m3
CEM I-42.5 R-SR5	280	kg/m3
Agua Efectiva	154	kg/m3
Agua Total	190	kg/m3
Master Fiber 254	7	kg/m3
Aditivo	0.6	%
Desairante	0.4	%



Asentamiento (22 cm)

AMASADA NO. 3 (20 °C SNFRC)

 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	 ICITECH <small>CIENCIA Y TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN</small>	Fecha	15/9/2020
		Página	01
FICHA RESUMEN		Autor	Najaronny Castillo

Tamaño máximo nominal (mm)	20
Humedad de los áridos (%)	2.2
Peso húmedo (g)	300
Peso seco constante (g)	298.6
Peso del recipiente (g)	288
Volumen de la mezcla (l)	80
Contenido de aire (%)	0.6
Tipo de fibra	MasterFiber 254
Aditivo	Sika 5980

Componentes	Dosificación 30/37 Mpa	Unidad
Grava 16/20 mm	183	kg/m ³
Grava 8/16 mm	402	kg/m ³
Grava 4/8 mm	146	kg/m ³
Arena roja	897	kg/m ³
Arena blanca	211	kg/m ³
CEM I-42.5 R-SR5	280	kg/m ³
Agua Efectiva	154	kg/m ³
Agua Total	190	kg/m ³
Master Fiber 254	7	kg/m ³
Aditivo	0.6	%
Desairante	0.4	%



Asentamiento (22 cm)

AMASADA NO.7 (60 °C SNFRC)

 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Fecha	15/9/2020
		Página	01
		Autor	Najaronny Castillo

FICHA RESUMEN

Tamaño máximo nominal (mm)	20
Humedad de los áridos (%)	1.67
Peso húmedo (g)	650
Peso seco constante (g)	248.2
Peso del recipiente (g)	1037.2
Volumen de la mezcla (l)	80
Contenido de aire (%)	0.33
Tipo de fibra	MasterFiber 254
Aditivo	Sika 5980

Componentes	Dosificación 30/37 Mpa	Unidad
Grava 16/20 mm	183	kg/m3
Grava 8/16 mm	402	kg/m3
Grava 4/8 mm	146	kg/m3
Arena roja	897	kg/m3
Arena blanca	211	kg/m3
CEM I-42.5 R-SR5	280	kg/m3
Agua Efectiva	154	kg/m3
Agua Total	190	kg/m3
Master Fiber 254	7	kg/m3
Aditivo	0.6	%
Desairante	0.4	%



Asentamiento (18.50 cm)

AMASADA NO.5 (-15 °C SFRC)

 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Fecha	15/9/2020
		Página	01
		FICHA RESUMEN	



Tamaño máximo nominal (mm)	20
Humedad de los áridos (%)	2.93
Peso húmedo (g)	650
Peso seco constante (g)	248.2
Peso del recipiente (g)	1037.2
Volumen de la mezcla (l)	80
Contenido de aire (%)	1.1
Tipo de fibra	Dramix 3D 65/35 BG
Aditivo	Sika 5980

Componentes	Dosificación 30/37 Mpa	Unidad
Grava 16/20 mm	183	kg/m3
Grava 8/16 mm	402	kg/m3
Grava 4/8 mm	146	kg/m3
Arena roja	897	kg/m3
Arena blanca	211	kg/m3
CEM I-42.5 R-SR5	280	kg/m3
Agua Efectiva	154	kg/m3
Agua Total	190	kg/m3
Dramix 3D 65/35BG	21	kg/m3
Aditivo	1.2	%
Desairante	0.4	%




Asentamiento (17 cm)

AMASADA NO.4 (20 °C SFRC)

 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Fecha	15/9/2020
		Página	01
FICHA RESUMEN		Autor	Najaronny Castillo

Tamaño máximo nominal (mm)	20
Humedad de los áridos (%)	2.93
Peso húmedo (g)	650
Peso seco constante (g)	248.2
Peso del recipiente (g)	1037.2
Volumen de la mezcla (l)	80
Contenido de aire (%)	1.1
Tipo de fibra	Dramix 3D 65/35 BG
Aditivo	Sika 5980

Componentes	Dosificación 30/37 Mpa	Unidad
Grava 16/20 mm	183	kg/m3
Grava 8/16 mm	402	kg/m3
Grava 4/8 mm	146	kg/m3
Arena roja	897	kg/m3
Arena blanca	211	kg/m3
CEM I-42.5 R-SR5	280	kg/m3
Agua Efectiva	154	kg/m3
Agua Total	190	kg/m3
Dramix 3D 65/35BG	21	kg/m3
Aditivo	1.2	%
Desairante	0.4	%



Asentamiento (17 cm)

AMASADA NO.10 (60 °C SFRC)

 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Fecha	15/9/2020
		Página	01
		FICHA RESUMEN	Autor

Tamaño máximo nominal (mm)	20
Humedad de los áridos (%)	2.93
Peso húmedo (g)	650
Peso seco constante (g)	248.2
Peso del recipiente (g)	1037.2
Volumen de la mezcla (l)	80
Contenido de aire (%)	1.1
Tipo de fibra	Dramix 3D 65/35 BG
Aditivo	Sika 5980

Componentes	Dosificación 30/37 Mpa	Unidad
Grava 16/20 mm	183	kg/m3
Grava 8/16 mm	402	kg/m3
Grava 4/8 mm	146	kg/m3
Arena roja	897	kg/m3
Arena blanca	211	kg/m3
CEM I-42.5 R-SR5	280	kg/m3
Agua Efectiva	154	kg/m3
Agua Total	190	kg/m3
Dramix 3D 65/35BG	21	kg/m3
Aditivo	1.2	%
Desairante	0.4	%



Asentamiento (17 cm)

DENSIDAD DE LOS ARIDOS FINOS ARENA ROJA Y BLANCA

 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA		Fecha	14/02/2021
		Página	01
		DENSIDAD DE ARIDOS FINOS	Autor

DENSIDAD ÁRIDO FINO - ARENA BLANCA

Fecha de ensayo:	04/02/2021	
Masa seca	716,8	g
Masa sat. parcial	734,0	g
Picn, muestra y agua	1117,0	g
Picnómetro y agua	673,8	g
Capacidad del pic	500,0	cm ³
Temp agua	22,0	°C
Densidad agua	1,0	g/cm ³
Densidad de la muestra seca	2,46	g/cm ³
Coefficiente de absorción de agua	2,40	%
Densidad real muestra sat. Sup seca	2,52	g/cm ³

DENSIDAD ÁRIDO FINO - ARENA ROJA

Fecha de ensayo:	04/02/2021	
Masa seca	729,0	g
Masa sat. parcial	734,2	g
Picn, muestra y agua	1130,6	g
Picnómetro y agua	672,4	g
Capacidad del pic	500,0	cm ³
Temp agua	22,0	°C
Densidad agua	1,0	g/cm ³
Densidad de la muestra seca	2,64	g/cm ³
Coefficiente de absorción de agua	0,71	%
Densidad real muestra sat. Sup seca	2,66	g/cm ³



We create chemistry

MasterFiber 254

High-performance Polypropylen-Makrofaser
gemäß DIN EN 14889-2 für Beton nach EN 206

Produkt - Daten	
Chemische Basis / Polymerart	Polypropylen
Farbe	Farblos
Dichte	910 kg/m ³
Klasse	II
Faserform (Längsrichtung)	Gewellt
Faserform (Querschnitt)	Unregelmäßig
Äquivalenter Durchmesser	0,81 mm
Zugfestigkeit	552 MPa
Elastizitätsmodul (Sekante)	6000 MPa
Elastizitätsmodul	7000 MPa
Länge	54 mm
Schlankheitsverhältnis	67
<i>Einfluss auf die Konsistenz von Beton</i>	
Faserdosierung	5 kg/m ³
Vébé-Zeit mit Fasern	11 s
Vébé-Zeit ohne Fasern	7 s
Schmelzpunkt TS	ca. 150–170 °C
Entzündungstemperatur Ti	ca. 350 °C

BEKAERT

better together

Dramix®



3D **65 / 35** **BG**

Esbeltez

Longitud

Acero gris
(Bright)

Encolada
(Glued)

FICHA TÉCNICA

Características

Propiedades del material

Resistencia Nominal a la tracción:	1.345 (N/mm ²)
Módulo de Young:	200.000 (N/mm ²)
Deformación máxima en tracción:	0,8 %

Geometría

Gama de fibras	3D	
Longitud (l)	35 mm	
Diámetro (d)	0,55 mm	
Ratio de esbeltez (l/d)	65	

Mínima dosificación según EN 14889-1

15 kg/m³

Red de fibras

8.032 m/m³ por 15 kg/m³
14.711 fibras/kg

Gama Dramix®

3D Aplicaciones estándar HRFA
4D Elevado control en servicio
5D Aplicaciones estructurales avanzadas

	5D	4D	3D
Resistencia a tracción			
Ductilidad del alambre			
Resistencia de anclaje			

Certificados del producto *



* Los certificados del producto son específicos de las plantas de producción.

Conformidad del producto

Dramix® cumple con las normas técnicas ASTM A820, EN 14889-1 e ISO 13270 clase A.

Certificados del sistema



Todas las plantas industriales Dramix® cuentan con el certificado ISO 9001 e ISO 14001.

Embalaje



Manipulación



DRAMIX® 3D 65/35BG

El anclaje original

Dramix® 3D es una fibra altamente rentable ideal para estructuras hiperestáticas estándar de hormigón sometidos a cargas estáticas habituales, de fatiga y a cargas dinámicas.

Tecnología encolada para refuerzo tridimensional

Las fibras de acero Dramix® están unidas con cola soluble en agua. La cola ayuda a evitar la formación de bolas de fibras durante el amasado y garantiza una distribución homogénea de las fibras en toda la mezcla de hormigón.

Bekaert Soporte técnico Bekaert

Puede contar con nuestro equipo de soporte para cada fase de su proyecto, desde el anteproyecto hasta durante la ejecución. Nuestros servicios incluyen recomendaciones sobre diseño de pavimentos, detalles de constructivos, optimización del hormigón y procedimientos automáticos de control de calidad. También nos complace compartir nuestros conocimientos con usted y su equipo. No dude en solicitarnos un seminario o formación sobre el refuerzo de fibras de acero en sus oficinas.

Para recomendaciones sobre manejo, dosificación y mezcla visite www.bekaert.com/dosingdramix. Cualquier otro documento específico o certificado se puede encontrar en www.bekaert.com/dramix/downloads.

Bekaert se reserva el derecho a modificar, renombrar o suspender la producción de este producto en cualquier momento con o sin previo aviso. Toda la información aquí contenida es general y puede no estar completa. Para más información póngase en contacto con la oficina local de Bekaert.

HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO

Sika® ViscoCrete®-5970

SUPERPLASTIFICANTE DE TERCERA GENERACIÓN PARA LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES PREPARADOS

**DESCRIPCION DEL PRODUCTO**

Superplastificante de tercera generación para hormigones preparados, tanto en planta de hormigón como en planta de obra. Está exento de cloruros.

USOS

- Hormigones fluidos y autocompactante (S.C.C.).
- Hormigones proyectados
- Hormigones con altas resistencias iniciales y finales
- Hormigones de altas durabilidad
- Hormigones fabricados en obra
- Hormigones fabricados en planta
- Hormigonado con temperaturas bajas-medias
- Hormigonado con curvas granulométricas no muy adecuadas

CARACTERISTICAS / VENTAJAS

- Se utiliza en la confección de hormigones con relaciones a/c bajas sin pérdida de propiedades como: bombeabilidad, fluidez, plasticidad
- La introducción de este aditivo en la fabricación del hormigón incrementa las resistencias iniciales y finales del mismo.
- Proporciona alta durabilidad e impermeabilidad en los hormigones

CERTIFICADOS / NORMAS

Cumple con las especificaciones de la norma UNE EN 932-2: Tablas 11.1 y 11.2 reductor de agua / plastificante / retardador

INFORMACION DEL PRODUCTO

Base Química	Policarboxilatos modificados.
Presentación	Contenedores de m ³ . Bajo pedido puede suministrarse a granel.
Apariencia / Color	Líquido marrón amarillento
Conservación	12 meses, desde su fecha de fabricación
Condiciones de Almacenamiento	En sus envases de origen bien cerrados y no deteriorados al resguardo de las heladas y de la luz directa del sol, entre +5°C y +35°C.
Densidad	Aprox. 1,06 Kg/l
pH	5 ±1

INFORMACION DE APLICACIÓN

Dosificación Recomendada	Dosificación recomendada Entre 0,5 y el 2% del peso del cemento.
Compatibilidad	El Sika® ViscoCrete®-5970 puede combinarse con otros aditivos Sika. Se recomienda la realización de ensayos previos en obra o consultar con el Departamento Técnico