

NUMERICAL SIMULATION OF BEAMS MANUFACTURED WITH ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE (UHPFRC)

Rosangel Rojas

Jose R. Yopez

rosangel.rojas@ufrgs.br

jose.aguirre@ufrgs.br

PhD student, Postgraduate Program in Civil Engineering -UFRGS

Av. Osvaldo Aranha n.99, 90035-190, Rio Grande do Sul/Porto Alegre, Brasil.

Américo C. Filho

americo@ufrgs.br

School of Engineering - Department of Civil Engineering

Av. Osvaldo Aranha n.99, 90035-190, Rio Grande do Sul/Porto Alegre, Brasil.

Abstract. The ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) is a new material that exhibits strength values higher than 150 MPa and 18 MPa in compression and tension, respectively. Its dense matrix minimizes pores and increases durability. The presence of fibers, increases the energy absorption capacity, induces deformation hardening behavior in the post-cracking phase and prevents fragile failure, when subjected to stress tensions. These properties place the UHPFRC among the most advanced concrete technologies, enhancing their use in the construction or repair of bridges, high-rise buildings and special structures such as nuclear facilities. The objective of this work is to numerically model the behavior of beams subjected to bending stress, through a finite element analysis using ANSYS. A total of thirteen beams were tested experimentally; these results are compared with the numerical simulation. Steel fibers with an aspect ratio of 65 were used, in percentages of 1% and 2%. In the simulation, 150.89 MPa is considered as the average value for the compressive strength, obtained from experimental tests carried out on twenty specimens. The elastic modulus considered is obtained from the behavior curve, by linear approximation between 5% and 80% of the peak resistance, whose average value was 48 GPa. Additionally, fracture energy is measured, which reached values of 16,26 kJ / m² and 22,60 kJ / m² for fiber percentages of 1% and 2% respectively.

Keywords: UHPFRC, numerical simulation, finite elements, strength, experimental.

1 Introducción

Vigas construidas con UHPFRC sometidas a esfuerzos de flexión tienen la capacidad de continuar soportando carga una vez agrietadas, su resistencia a la tracción no es despreciable. En el comportamiento post-agrietamiento las fibras tienen una participación fundamental, cuando adecuadamente orientadas evitan la falla frágil por el efecto de puente que se origina entre ambas caras de la grieta. Naaman et al. [1] realiza una clasificación para el concreto reforzado con fibras o FRC (Fibre Reinforced Concrete) que puede ser aplicada al UHPFRC. El autor clasifica al FRC en función de su comportamiento inelástico: (i) tracción con endurecimiento por deformación o strain hardening, en la cual el esfuerzo máximo en la zona agrietada es mayor al esfuerzo en el límite elástico; y (ii) tracción con deformación suavizada o strain softening, en la cual el esfuerzo en el límite elástico es mayor al esfuerzo máximo en la zona agrietada, en la Fig. 1 se visualizan ambos comportamientos. Las recomendaciones AFGC [2] indican que el UHPFRC sometido a tracción puede presentar los comportamientos citados en el párrafo anterior y también define un comportamiento intermedio, llamado de bajo endurecimiento por deformación. En el presente trabajo, vigas conteniendo 1% de fibras cortas de acero presentan comportamiento strain softening y con 2% el comportamiento es de strain hardening. Las curvas experimentales carga vs deflexión (F vs δ) son graficadas para compararlas con las mismas curvas obtenidas analíticamente.

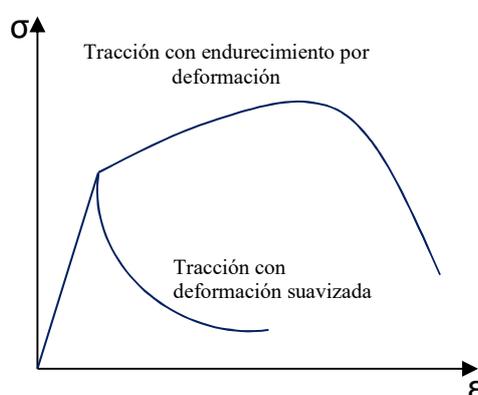


Figura 1. Tipos de comportamiento del UHPFRC a la tracción. Fuente propia.

La respuesta analítica de F vs δ es obtenida por simulación numérica del ensayo experimental usando ANSYS. A partir de pruebas de flexión realizadas en el laboratorio se obtienen los parámetros de entrada de datos que requiere el programa, ejemplo de ello puede ser consultado en Richard et al. [3], Chanvillard et al. [4], Orgass et al. [5] y Fehling et al. [6], los cuales analizaron el comportamiento a tracción de vigas de prismáticas sometidas a ensayos de flexión en tres y cuatro puntos, obteniendo valores de resistencia a la tracción en el rango de 16 a 50 MPa. Algunos de esos parámetros son difíciles de determinar experimentalmente, por lo cual se realizó análisis inverso para obtenerlos, ejemplo de este tipo de análisis puede ser consultado en López et al. [7], Baby et al. [8] y Lee et al.

[9], los cuales utilizaron análisis inverso para estudiar numéricamente el comportamiento del UHPFRC sometido a esfuerzo de tracción en la flexión.

2 Metodología

2.1. Trabajo experimental

Los especímenes fueron fabricados usando el diseño de mezcla mostrado en la Tabla 1, detalles del diseño y proceso de fabricación de la mezcla puede ser consultado en Rojas et al. [10].

Tabla 1. Diseño de Mezcla UHPFRC. Fuente propia.

Materiales (kg/m ³)	UHPFRC
Cemento	955
GGBS	263
Sílica Fume	119
Polvo de Cuarzo	119
Arena Fina	788
Superplastificante	40
Agua	185
Fibras de Acero 1%	79
Fibras de Acero 2%	157

La resistencia a la compresión es calculada como el valor promedio de veinte especímenes cilíndricos ensayados uniaxialmente a una velocidad de carga de 0,5 mm/min, Rojas et al. [11]. Para cada ensayo una curva de comportamiento esfuerzo-deformación (σ - ϵ) es establecida y el módulo de elasticidad se calcula por aproximación lineal entre 5% y 80% de la resistencia a la compresión pico, cuyo valor promedio fue de 47707,96 MPa o 48 GPa.

El comportamiento a tracción del UHPFRC ha sido estudiado principalmente por dos tipos de ensayos: (i) pruebas de tracción directa usando especímenes tipo Dog-Bone, y (ii) pruebas de tracción en la flexión usando vigas prismáticas. En este estudio se selecciona trabajar con vigas prismáticas, ver Fig. 3, a las cuales se le abre una ranura inferior, de 3 cm de altura y 0,4 cm de ancho, sobre la cual se coloca un LVDT horizontal para medir la abertura de la trinca (w), adicionalmente se colocan dos LVDT verticales ubicados en ambos lados de la viga para medir y promediar la deflexión (δ).

Ensayos de flexión en tres puntos son realizados usando una prensa hidráulica con capacidad de 2000kN a una velocidad de 0,5 mm/min, ver Fig. 4, proceso que es aplicado en las trece vigas: (i) tres vigas sin fibras (0%), (ii) cuatro vigas con 1% de fibras, y (iii) seis vigas con 2% de fibras. Se utilizaron fibras de acero tipo Dramix, con una relación de aspecto de 65 (13 mm de longitud y 0,2 mm de diámetro). Todas las vigas se ensayaron a los 28 días de curado, cuidando la varianza experimental por medio del uso de materiales de un mismo lote en el proceso de fabricación, los mismos equipos para la fabricación y ensayo de las probetas. Los resultados son registrados para

proceder posteriormente a graficar las curvas carga versus deflexión ($F-\delta$) y carga versus abertura de la trinca ($F-\omega$) del material. En la Fig. 4 a) visualizamos el ensayo y en la 4 b) el tipo de falla en las probetas.

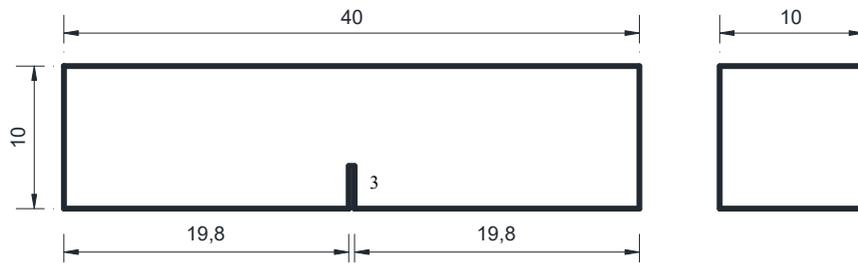


Figura 3. Dimensiones de las vigas prismáticas (en cm). Fuente propia.

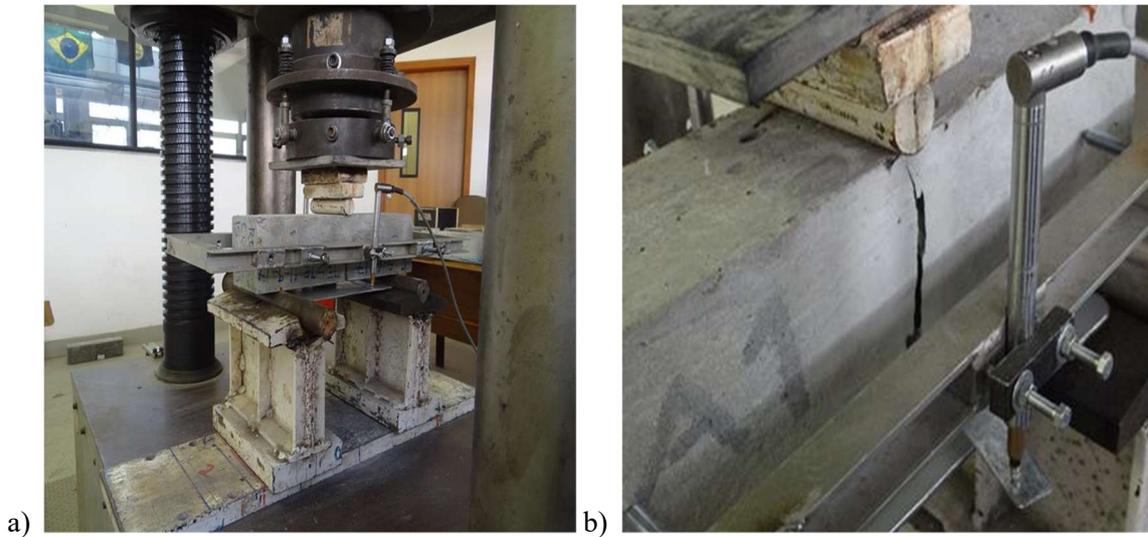


Figura 4. a) Ensayo de tracción en tres puntos, b) Tipo de falla. Fuente propia.

Las Figuras 5, 6 y 7 muestran las curvas carga versus deflexión (F vs. δ) de cada espécimen ensayado a flexión en tres puntos, incluyendo la curva promedio, para vigas de UHPFRC con 0%, 1% y 2% de fibras.

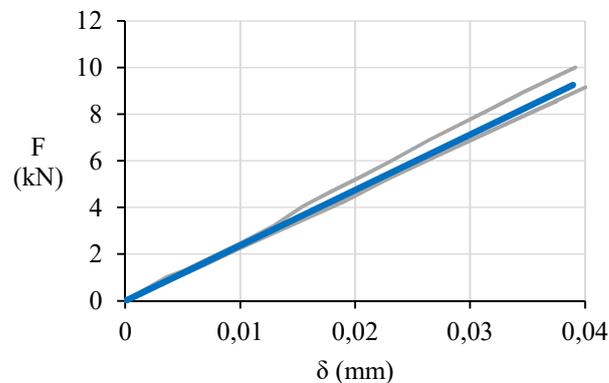


Figura 5. Resultados carga (F) vs. deflexión (δ) para vigas sin fibras. Fuente propia.

El valor de la resistencia a la flexión elástica promedio fue de 8,50 MPa; 10,14 MPa y 14,50 MPa para vigas con 0%, 1% y 2% de fibras respectivamente. Adicionalmente fue calculada la energía de fractura en cada curva F vs. δ , según las especificaciones de RILEM [12] para 1% y 2%, las cuales pueden ser observadas en la Tabla 2. El cuerpo de prueba (CP) 6 fue excluido del promedio, por estar muy apartado de la media.

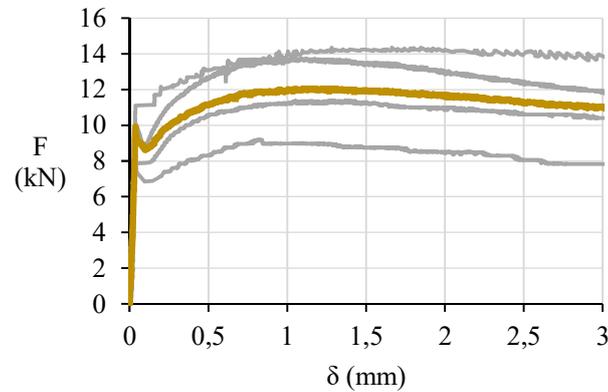


Figura 6. Resultados carga (F) vs. deflexión (δ) para vigas con 1% de fibras. Fuente propia.

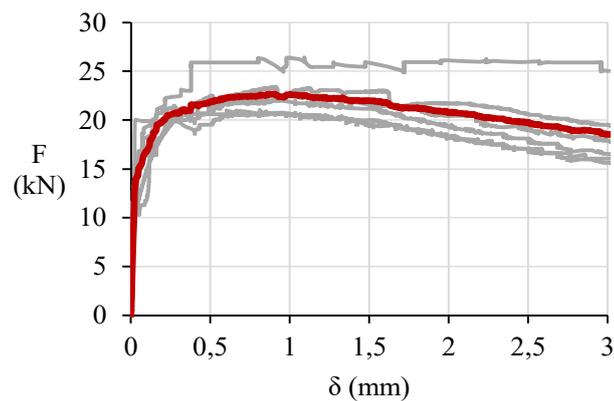


Figura 7. Resultados carga (F) vs. deflexión (δ) para vigas con 2% de fibras. Fuente propia.

Tabla 2. Energía de fractura (kJ/m^2)

CP	1%	2%
1	11,66	23,76
2	18,75	18,64
3	15,42	22,35
4	19,22	19,38
5		28,89
6		52,83
Média:	16,26	22,60

Las Figuras 5 a la 7 corresponden a la respuesta experimental F vs δ del UHPFRC con 1% y 2% de contenido de fibras, que serán comparadas con las curvas obtenidas a partir de la simulación numérica usando ANSYS.

2.2. Simulación numérica

Simular de forma fidedigna las fibras distribuidas aleatoriamente dentro de la matriz de concreto es un procedimiento complejo, además demanda un esfuerzo computacional que escapa del alcance de esta pesquisa. Sin embargo, buenas aproximaciones pueden ser realizadas para modelar analíticamente el problema real. En la fase experimental de este trabajo fue aplicada una técnica de vaciado del concreto propuesto por Yang et al. [13], que consistió en llenar las formas de la viga desde un extremo hacia el otro, de modo que las fibras permanezcan orientadas en el sentido de mayor eficiencia, en nuestro caso, perpendiculares a la dirección de la carga. Después de ensayadas, las vigas fueron cortadas transversalmente para calcular el porcentaje efectivo de fibras a incluir en el modelaje numérico, ver Fig. 8.

El programa de elementos finitos ANSYS es usado en su modo clásico Mechanic APDL utilizando lenguaje paramétrico de diseño, para simular el ensayo a flexión en tres puntos sobre las vigas fabricadas con UHPFRC con muesca central en el vano inferior. La simulación numérica se realiza usando el elemento SOLID65.

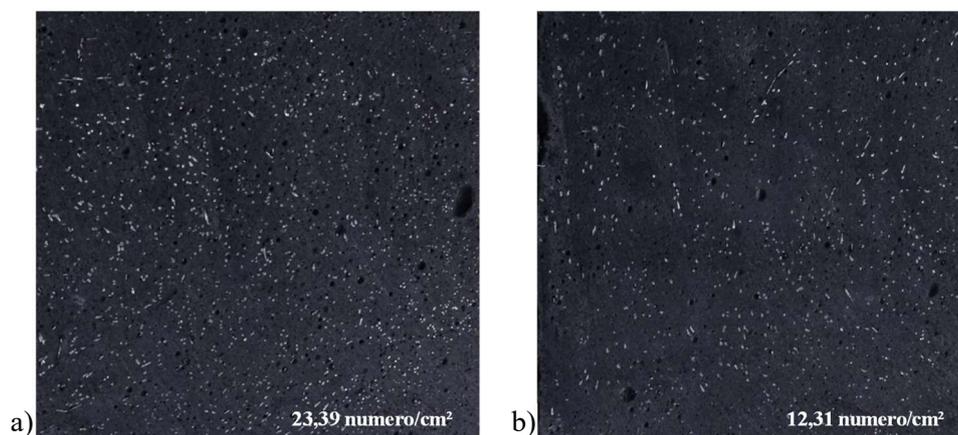


Figura 8. Cantidad de fibras por cm^2 , a) 2%, b) 1%. Fuente propia

Se seleccionó el elemento SOLID65 para el modelado 3-D del UHPFRC porque el elemento permite considerar el acero de forma distribuida a lo largo de todo el elemento estructural. Esa cantidad de acero va a representar el porcentaje de fibras dentro de la matriz y debe ser incluida como una variable real. SOLID65 tiene la capacidad de agrietarse en tracción, aplastarse en compresión y puede desarrollar un comportamiento no-lineal, también es aplicable para modelar compuestos reforzados. El elemento está definido por ocho nodos que tienen tres grados de libertad en cada nodo: traslaciones en las direcciones nodal x, y, z.

La geometría, la ubicación de los nodos y el sistema de coordenadas para este elemento se muestran en la Fig. 9. El concreto es considerado isotrópico y las fibras son consideradas distribuidas dentro del concreto. Se introducen los valores experimentales obtenidos de las curvas para la

resistencia a la compresión, tracción y módulo de elasticidad del concreto. También se incluye el módulo de elasticidad del acero y los valores del módulo del Poisson para ambos materiales, concreto y acero. Cuando el objetivo del análisis es considerar la respuesta no lineal, es decir, considerar el comportamiento post-agrietamiento del concreto, ANSYS permite usar el modelo de Willam e Warnke [14] identificado por el comando TB,CONCR que es compatible con el elemento SOLID65. TB,CONCR es un modelo de material que predice la falla de materiales frágiles, tomando en cuenta los modos de falla por agrietamiento y aplastamiento. Se necesitan un total de cinco parámetros de resistencia, cada uno de los cuales puede depender de la temperatura, para definir la superficie de falla y el estado multiaxial de esfuerzos. En nuestro caso trabajaremos con un solo tipo de temperatura y de los cinco parámetros sólo consideraremos la resistencia a la compresión uniaxial última y la resistencia a la tracción uniaxial última, ambas determinadas experimentalmente. Las especificaciones del acero de refuerzo, en nuestro caso las fibras, se introducen como constantes reales, que incluye además del número de material, la relación de volumen (porcentaje de fibras) y los ángulos de orientación de las fibras. El comando TB,BKIN es usado para definir el comportamiento bilineal de endurecimiento cinemático de las fibras, es decir, permite considerar la ley de comportamiento elastoplástico del material.

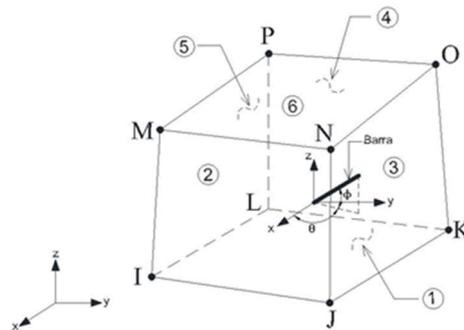


Figura 9. Elemento SOLID65. Fuente: ayuda ANSYS

En el trabajo experimental fue observado que las fibras fallaron por deslizamiento, por lo que fue posible suponer que el acero de las fibras no llegó a fluir. Un estereomicroscópio es usado para verificar el deslizamiento de las fibras dentro de la matriz de UHPFRC, como puede verse en la Fig. 4.

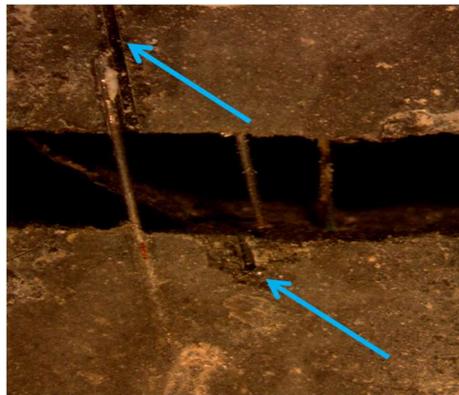


Figura 10. Deslizamiento de las fibras dentro de la matriz. Fuente propia

El modelo utilizado en este estudio no permite simular el deslizamiento de las fibras verificado experimentalmente, por lo tanto, es necesario definir un valor equivalente del esfuerzo de fluencia (f_y) a considerar en el modelaje numérico, el cual será calculado a partir de la valor máximo de la resistencia a la adherencia de la fibra de acero dentro de la matriz de concreto ($\tau_{f,m\acute{a}x}$) cuando la viga es sometida a la carga máxima. Utilizaremos análisis inverso para calcular el valor de $\tau_{f,m\acute{a}x}$ siguiendo la metodología propuesta por Lee et al. [9].

El análisis se inicia idealizando el comportamiento a la flexión de vigas fabricadas con UHPFRC sometidas a flexión en tres puntos, a partir de la cual se desarrolla de una grieta dominante, ver en la Fig. 11 el mecanismo de falla. Usando la data experimental, aplicando relaciones constitutivas y de equilibrio mecánico para el UHPFRC, se calcula el $\tau_{f,m\acute{a}x}$. Para ello un proceso iterativo es desarrollado el cual cierra cuando la fuerza externa máxima F aplicada sobre la viga es igual a la fuerza interna F máxima calculada usando análisis inverso (AI), ver el algoritmo de la Fig. 12.

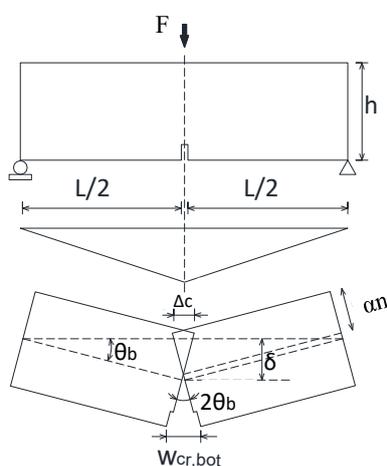


Figura 11. Mecanismo de falla de la viga idealizado. Fuente Lee et al. [9] modificado.

Con el valor de $\tau_{f,m\acute{a}x}$ se calcula primeramente la fuerza de tracción y luego el esfuerzo de tracción sobre la fibra. Éste último se convierte en un valor equivalente del esfuerzo de fluencia del acero, surgiendo como un límite superior que puede ser variado dentro del script del modelo numérico, para evaluar la respuesta del elemento estructural simulado en ANSYS y ajustar la curva.

El análisis inverso consiste en un procedimiento iterativo para, a partir del conocimiento de ciertos parámetros obtenidos en ensayos experimentales, determinar el valor de la fuerza a tracción que permita el equilibrio mecánico en la sección transversal de la viga. En el inicio algunos valores desconocidos, como la profundidad del eje neutro (α_n) y la resistencia a la adherencia de una fibra recta de acero ($\tau_{f,m\acute{a}x}$) son asumidos. Con esos valores iniciales se calcula la fuerza de compresión (F_c) y la fuerza de tracción elástica (F_{t1}), en cada caso son iguales al área de esfuerzo triangular multiplicada por el ancho de la viga. Luego, a partir del diagrama de deformaciones de la Fig. 13, se calculan los valores de Δ_{cr} , y_{cr} y $\omega_{cr,a}$, que corresponden a la deformación en compresión, altura

crítica medida desde el eje neutro y la abertura de la muesca cuando ocurre la primera grieta, respectivamente.

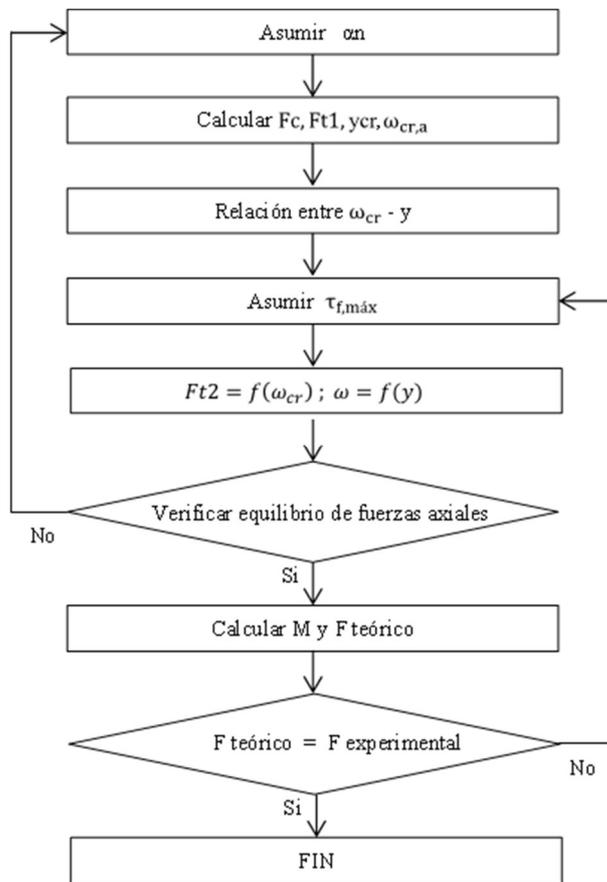


Figura 12. Algoritmo para calcular la resistencia de adherencia. Fuente Lee et al. [9] modificado

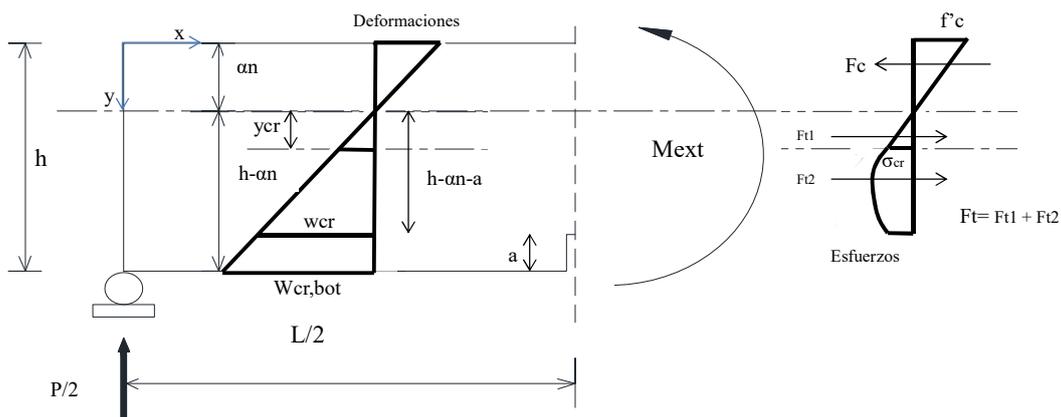


Figura 13. Distribución de esfuerzos y deformaciones de la sección agrietada. Fuente propia.

La abertura de la trinca varía con la altura de la viga, por tanto, una relación lineal $(\omega_{cr} - y)$ debe ser definida, donde “y” es la altura de la viga en cualquier punto, medida desde la fibra más comprimida. La fuerza a tracción inelástica (Ft2) es equivalente a la sumatoria de esa fuerza calculada en cada uno de los segmentos en los que se divide el área bajo la curva encerrada entre ycr hasta $(h-$

αn -a), ambas longitudes medidas a partir del eje neutro. Los aportes de la matriz de concreto y de las fibras definidos por las Ecuaciones 1 y 2 son incluidos en el cálculo de Ft2.

$$\sigma_{t2c} = f_{cr} e^{-30\omega_{cr}} \quad (1)$$

$$\sigma_{t2f} = \alpha_f V_f K_{st} \tau_{f,m\acute{a}x} \frac{l_f}{d_f} \left(1 - \frac{2\omega_{cr}}{l_f}\right)^2 \quad (2)$$

Donde:

ω_{cr} = Abertura de la muesca

f_{cr} = Resistencia de la matriz de concreto al agrietamiento

El equilibrio de las fuerzas axiales es verificado, si no cumple se varían nuevamente los valores asumidos en el inicio. Cuando el equilibrio es verificado el momento interno (M) es calculado, para a su vez determinar un valor teórico de la carga aplicada. El valor teórico de la carga aplicada F se compara con el valor experimental, la diferencia entre ambas debe ser próxima de cero, consideraremos una tolerancia de 0,5%, ver Tabla 3.

En la configuración del mecanismo de falla de la viga de la Fig. 11 se considera una distribución, ángulo de inclinación y longitud de anclaje aleatorio para las fibras dentro de la matriz de concreto. También se considera una distribución uniforme del esfuerzo de adherencia a lo largo de las fibras. El UHPFRC presenta una relación esfuerzo vs deformación (σ - ϵ) lineal antes de alcanzar la resistencia a la compresión pico, por lo tanto, las siguientes expresiones pueden ser usadas:

$$F_c = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{co}} f'_c = \epsilon_c E_c \quad \text{para} \quad \epsilon_{co} \leq \epsilon_c < 0 \quad (3)$$

$$F_c = \epsilon_c E_c \quad \text{para} \quad 0 \leq \epsilon_c < \epsilon_{cr} \quad (4)$$

A partir de la Fig. 13 se establecen las ecuaciones 3 al 7, para finalmente establecer la relación entre deformaciones y aberturas de la grieta en la Ecuación 8.

$$\Delta c = \int_0^L \epsilon_{x,top} dx = \frac{1}{2} \epsilon_{c,top} L \quad (5)$$

$$\tan \theta_b = \theta_b = \frac{\Delta_b}{2\alpha n} \quad (6)$$

$$\omega_{cr,bot} = 2\theta_b (h - \alpha n) \quad (7)$$

$$E_{c,top} = \frac{2}{L} \frac{\alpha n}{h - \alpha n} \omega_{cr,bot} \quad (8)$$

Donde:

f'_c = Resistencia a la compresión del UHPFRC

E_c = Módulo de elasticidad del UHPFRC

ε_{co} = Deformación correspondiente a f'_c

$\varepsilon_{cr} = f_{cr}/E_c$ = Deformación correspondiente a f_{cr}

Δc = Deformación en compresión

$\varepsilon_{c,top}$ = Deformación unitaria de la fibra más comprimida

$\omega_{cr,bot}$ = Abertura en la parte inferior de la grieta

θ_b = Ángulo de rotación de la viga agrietada

Del equilibrio de las fuerzas axiales en la Fig. 13 tenemos que $F_c + F_t = 0$, donde F_c es la fuerza de compresión y F_t la fuerza de tracción que a su vez se subdivide en la tracción elástica de la matriz de concreto con fibras o F_{t1} y la fuerza de tracción inelástica F_{t2} atribuida al concreto con fibras agrietado. En la zona elástica el cálculo de las fuerzas (F_c y F_{t1}) es directo e igual al valor de cada área triangular multiplicada por el ancho de la viga. En la zona inelástica el cálculo de F_{t2} no es tan simple, es necesario calcular el área bajo la curva que varía en función de la altura del eje neutro y de la abertura de la trinca. Ese esfuerzo de tracción inelástico incluye los efectos tanto del concreto (σ_{t2c}) como de las fibras rectas de acero (σ_{t2f}), ver las Ecuaciones 1 y 2.

El valor del factor que representa el esfuerzo de adherencia promedio de las fibras o K_{st} es determinado en función de la abertura de la grieta o ω_{cr} , como se indica a continuación.

Para $\omega_{cr} < s_f$ tenemos:

$$K_{st} = \frac{\beta_f \omega_{cr}}{3 s_f} \quad (9)$$

Para $\omega_{cr} \geq s_f$ tenemos:

$$K_{st} = 1 - \sqrt{\frac{s_f}{\omega_{cr}}} + \frac{\beta_f}{3} \sqrt{\frac{s_f}{\omega_{cr}}} \quad (10)$$

Donde:

α_f = Factor de orientación de las fibras, usualmente se usa el valor de 0,5

V_f = Porcentaje volumétrico de fibras

K_{st} = Factor que representa el esfuerzo de adherencia promedio de las fibras considerando una distribución aleatoria de las mismas dentro de la matriz de concreto

l_f = Longitud de la fibra

d_f = Diámetro de la fibra

S_f = Deslizamiento de la fibra correspondiente a la resistencia de adherencia de una fibra recta de acero, el cual puede tomar el valor de 0,01 mm

β_f = Coeficiente para considerar efectos del deslizamiento de la fibra, es igual a 0,67

Tabla 3. Resultados del análisis inverso realizado según el esquema de la Fig. 12.

Valor asumido:			
a_c (mm)=	3,5115		
Primeros cálculos:			
F_c (kN)=	26,49		
y_{cr} (mm)=	0,2143		
F_{t1} (kN)=	0,10		
$\omega_{cr,a}$ (mm)=	1,0735		
ω_{cr} (mm)=	0,011090	y	
y (mm)	ω_{cr} (mm)	$F_{t2,c}$ (kN)	$M_{Ft2,c}$ (kN.mm)
2,7614	0,0306	3,36	21,82
8,2843	0,0919	2,11	25,31
13,8071	0,1531	1,97	34,62
19,3300	0,2144	2,00	46,21
24,8528	0,2756	2,04	58,42
30,3757	0,3369	2,08	70,80
35,8985	0,3981	2,10	83,23
41,4214	0,4594	2,12	95,69
46,9442	0,5206	2,13	108,16
52,4671	0,5819	2,15	120,64
57,9900	0,6431	2,16	133,11
63,5128	0,7044	2,16	145,57
Subtotal=		26,39	943,58
F_c =	F_{t1} +	F_{t2}	
26,49 =	0,10 +	26,39	
26,49 =	26,49		
M_c =	M_{t1} +	M_{t2}	
31,01 =	0,36 +	943,58	
M (kN.mm) =	M_{t1}	M_{t2} -	M_c
M (kN.mm) =	912,93		
P (kN) =	12,17		
P (kN) experimental	P (kN) numérico		
12,16729	12,17243	Diferencia del 5‰	

Además del esfuerzo de fluencia, cuya determinación fue explicada anteriormente y del porcentaje de acero, también calculado por medición directa sobre la sección transversal de la viga, tenemos otros parámetros de origen experimental necesarios para la simulación numérica usando ANSYS: (i) resistencia a la compresión igual a 150,89 MPa; (ii) resistencia a la tracción uniaxial igual a 7,51 MPa y 9,26 Mpa para 1% y 2% de fibras respectivamente; (iii) módulo de elasticidad tanto del concreto como de las fibras de acero, 48 GPa y 210 GPa respectivamente; y (iv) coeficiente de Poisson tanto del concreto como de las fibras de acero con valores de 0,2 y 0,3 respectivamente.

La simulación es realizada para todos los especímenes usando microfibras de acero, con porcentajes de fibras de 1% y 2%. Las curvas experimentales promedio de F vs δ son comparadas con las curvas analíticas o numéricas usando ANSYS, para cada uno de los casos.

3 Resultados

La Figura 14 muestra una imagen de la simulación por elementos finitos usando ANSYS. Por simetría se modeló solo la mitad de la viga.

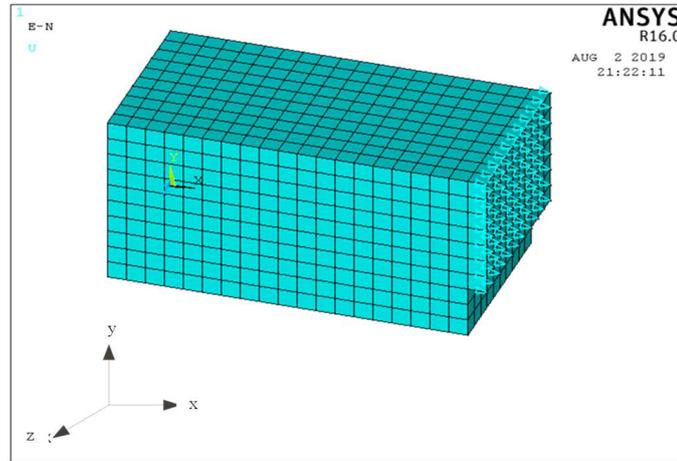


Figura 14. Simulación por elementos finitos. Fuente propia.

Los resultados del modelaje son graficados y comparados con las curvas experimentales promedio con 1% de fibras, ver Fig. 15 y 2% de fibras, ver Fig. 16. Los parámetros experimentales son introducidos en ANSYS usando unidades en kN y cm, con los siguientes valores: (i) 15,089 kN/cm² de resistencia a la compresión promedio; (ii) 4770,796 kN/cm² para el módulo de elasticidad del concreto; (iii) 1,22 kN/cm² de resistencia a la tracción promedio para 1% de fibras; (iv) 2,27 kN/cm² de resistencia a la tracción promedio para 2% de fibras; (v) 70 kN/cm² para el esfuerzo de fluencia de las fibras de acero, por análisis inverso se obtuvo el valor límite superior de 173,81 kN/cm², en la Tabla 3 se observa el cálculo iterativo de la resistencia a la adherencia de la fibra, cuyo valor fue de 13,37 MPa y con el cual se calcula la fuerza y el esfuerzo de tracción en la fibra.

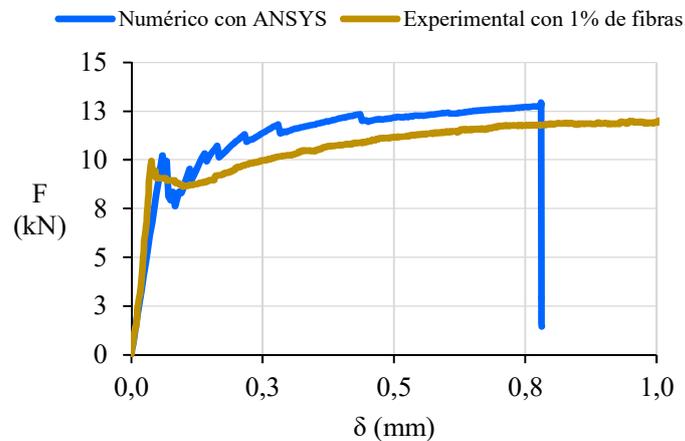


Figura 15. Respuesta experimental vs. simulación numérica para 1% de fibras. Fuente propia.

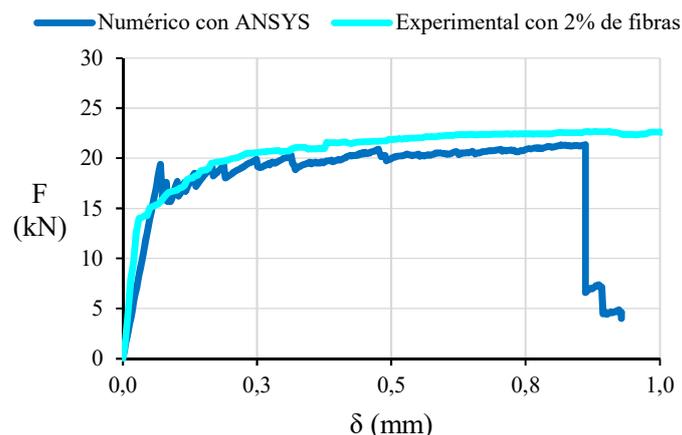


Figura 16. Respuesta experimental vs. simulación numérica para 2% de fibras. Fuente propia.

También se consideraron otros parámetros comúnmente usados en la bibliografía consultada: (vi) $2,1E04 \text{ kN/cm}^2$ para el módulo de elasticidad de las fibras de acero; y (vii) 0,22 y 0,30 para los módulos de Poisson del concreto y acero respectivamente. Las fibras se orientaron según los ejes locales, en nuestro caso tenemos: (i) el eje local “x” coincide con el eje global “y” en sentido contrario, (ii) el eje local “y” coincide con el eje global “z” en sentido contrario, y (iii) el eje local “z” coincide con el eje global “x”. Los ejes globales son mostrados en la Fig.14, por tanto, el ángulo θ señalado en la Fig. 9 fue considerado igual a cero y el ángulo ϕ igual a 90 grados.

4 Análisis de los resultados

El concreto de ultra alto desempeño reforzado con fibras o UHPFRC fue caracterizado experimentalmente en este estudio según su resistencia de tracción en la flexión. Los valores de la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, determinados experimentalmente en Rojas et al. [11] y utilizados en este estudio, están dentro de los rangos establecidos por el ACI [15] para caracterizar al UHPFRC.

En la Figura 17 se muestran las curvas F vs. δ para los tres contenidos de fibra. Observando que dentro del rango elástico no existe diferencia significativa entre las curvas, principalmente ente 0% y 1%, con lo cual podemos suponer que porcentajes menores al 2% de fibras cortas de acero en la matriz de concreto no tienen influencia significativa en el valor máximo de la resistencia a la tracción elástica. En el comportamiento inelástico existe diferencias significativas en el valor de la resistencia máxima a la tracción agrietada (f_{cr}) entre los contenidos 1% y 2% de fibras, los cuales alcanzaron valores de 12,17 kN y 22,68 kN con deflexiones de 1,11 mm y 0,99 mm respectivamente. Duplicar el contenido de fibras prácticamente duplicó el valor de f_{cr} y la flecha disminuyó 11%.

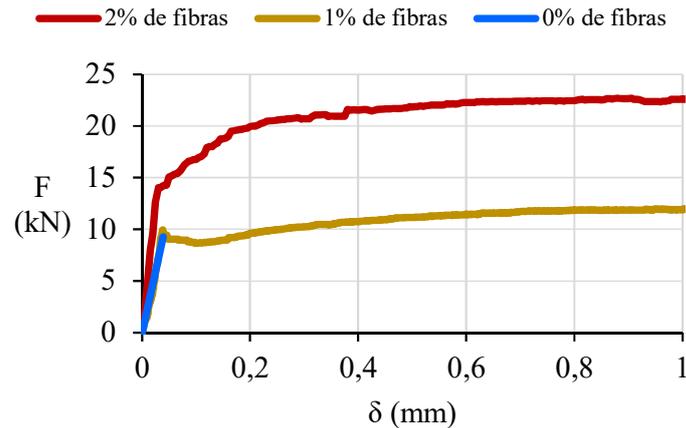


Figura 17. Respuesta experimental promedio para 0%, 1% y 2% de fibras. Fuente propia.

RILEM [12] caracteriza al concreto reforzado con fibras o FRC según los valores de la energía de fractura calculada a partir de los diagramas de carga versus deflexión. Algunos autores como Shah Surendra [16], Thanh et al. [17] y Mustapha et al. [18] también se basan en esa metodología para estudiar el comportamiento de vigas de UHPFRC post-agrietamiento. Los valores de energía de fractura promedio obtenidos en nuestro estudio, para caracterizar el material, fueron comparados con los resultados de otros autores en la Tabla 4. Notamos que los resultados obtenidos se encuentran cercanos a los valores obtenidos en la consulta bibliográfica.

Tabla 4. Energía de fractura, comparación

Autor	Contenido de fibras	
	1%	2%
Willie et al. [19]	-	22,1
Gesoglu et al. [20]	8	12
Thanh et al [17]	15,7	-
Rojas, et al	16,3	22,6

El valor calculado para la resistencia a la adherencia de la fibra de acero ($\tau_{f,m\acute{a}x}$) calculado por análisis inverso fue de 13,37 MPa. Los parámetros requeridos para ese análisis fueron obtenidos de los diagramas (F vs. δ) y (F vs. ω). Wille K. [19] calcula experimentalmente ese valor y da como resultado 12 MPa, lo que equivale a una diferencia del 10,2%, por tanto, consideramos nuestro resultado aceptable. Con ese valor se calculó la fuerza de tracción en la fibra, arrojando un valor de 54,60 N, que fue dividido por el área transversal para calcular en 1738,10 MPa el esfuerzo de tracción de la fibra. Las especificaciones técnicas para las fibras de acero usadas en este estudio (tipo Dramix de 13 mm de longitud y 0,2 mm de diámetro) señalan una resistencia a la fluencia entre 2500 a 2800 MPa, el resultado del análisis inverso indica que las fibras dentro de la matriz de UHPFRC de nuestras vigas no llegan a fluir, no rompen, fallan por deslizamiento. Este hecho fue corroborado en el trabajo experimental de forma visual, usando una lámpara con alta luminosidad y lupa.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Centro de Mecánica Aplicada Computacional CEMACOM-UFRGS y a LEME-UFRGS por permitir el desarrollo de la pesquisa y a la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por el financiamiento.

Referencias

- [1] A. Naaman and H. Reinhardt. Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. *Journal Materials and Structures*, n. 39, pp. 547-555, 2006.
- [2] AFGC (2013). Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes. Recommendations.
- [3] P. Richard, 1996. Reactive Powder Concrete - a new ultra high strength cementitious material. *4th International Symposium Utilization of High Strength/Performance Concrete*. Paris, pp. 1343-1349.
- [4] G. Chanvillard and S. Rigaud, 2003. Complete Characterisation of Tensile Properties of Ductal UHPFRC according to the French recommendations. *Proceedings of the 4th International Symposium on High Performance Fiber Reinforced Concretes (HPFRC4)*, pp.21-34.
- [5] M. Orgass and Y. Klug, 2004. Fibre Reinforced Ultra-High Strength Concretes. *1º International Symposium on UHPC*. Kassel (Germany), pp. 637-648.
- [6] E. Fehling, M. Schmidt, K. Bunje, W. Schreiber, 2004. Ultra High Performance Composite Bridge across the River Fulda in Kassel - Conceptual Design, Calculations and Invitation to Tender. *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*. Kassel University, Germany, pp. 69-75.
- [7] J. López, P. Serna, J. Navarro, E. Camacho. An inverse analysis method based on deflection to curvature transformation to determine the tensile properties of UHPFRC. *Journal Materials and Structures*, vol. 48, pp. 3703-3718, 2015.
- [8] F. Baby, B. Graybeal, P. Marchand, F. Toutlemonde. UHPFRC tensile behavior characterization: inverse analysis of four-point bending test results. *Journal Materials and Structures*, vol. 46, pp. 1337-1354, 2013.
- [9] S. Lee, H. Kim, Ch. Joh. Inverse Analysis of UHPFRC Beams with a Notch to Evaluate Tensile Behavior. *Journal Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 1, pp. 1-10, 2017.
- [10] R. Rojas, C. Korzenowsk, J. Yepez, R. Beraldin, L. Pinto, A. Campos. Investigating mixing designs to produce Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) using ANOVA *Revista Matéria (Rio J.)* [online], vol.24, n.2, 2019, e12365, 2019.
- [11] R. Rojas, C. J. Yepez, C. Korzenowsk, J. Beraldin, L. Pinto, A. Campos, 2018. *Experimental study of concrete mixtures to produce UHPFRC using sustainable materials*. XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Lima, Perú.
- [12] RILEM TC 162-TDF: Test and design methods for steel fiber reinforced concrete. *Rilem Materials and Structures*, vol.35, pp. 262-278, 2002.
- [13] I. Yang, C. Joh, B. Kim. Structural behavior of ultra-high performance concrete beams subjected to bending. *Journal Engineering Structural*, vol.32, n.11, pp.3478-3487.
- [14] K. Willam and E. Warnke. Constitutive Model for the Triaxial Behavior of Concrete. *Proceedings, International Association for Bridge and Structural Engineering*. Vol. 19. ISMES. Bergamo, Italy. p. 174, 1975.
- [15] ACI Committee 239R-18 2018. Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report.
- [16] Shah Surendra. Determination of Fracture Parameters and of Plain Concrete using Three-Point Bend Tests. *Journal Materials and Structures*, vol. 23, n. 6, pp. 457-460, 1990.
- [17] N. Thanh, T. Kiet, J. Kyu, J. Kil, D. Joo. Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates. *Journal Cement and Concrete Research*, vol. 79, pp. 169-184, 2016.
- [18] I. Mustapha, M. Farhat, I. Mohsen, J. Hasse. Mechanic properties of Ultra-High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 114, n. 3, pp. 453-466, 2017.

- [19] K. Wille, S. El-Tawil, A. Naaman. Properties of strain hardening ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading. *Journal Cement and Concrete Compositum*, vol. 48. Pp. 53-66, 2014.
- [20] Gesoglu, M.; Guneyisi, E.; Muhyddin, G.; Asaad, D. Strain hardening ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites: Effect of fiber type and concentration. *Journal Composites Part B*, n.103, 2016; p.74-83.