

## MURO DE SOSTENIMIENTO PREFABRICADO CON HORMIGÓN DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES REFORZADO CON FIBRAS

### RETAINING WALL PRECAST WITH ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETE REINFORCED WITH FIBERS

Santiago Garay<sup>a</sup>, Martín Almenar<sup>a</sup>, Facundo Isla<sup>a</sup> y Bibiana Luccioni<sup>a</sup>

<sup>a</sup>*Instituto de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, santigaray97@gmail.com, malmenar@herrera.unt.edu.ar, <https://www.facet.unt.edu.ar/iest/>*

**Palabras clave:** Muro de sostenimiento, Hormigón con Fibras, Elementos prefabricados.

**Resumen.** El trabajo consiste en el estudio numérico del comportamiento mecánico de muros de sostenimiento prefabricados con Hormigones de Ultra Altas Prestaciones Reforzados con Fibra (HUAPRF). Se analizan los efectos de las variables de diseño para un dimensionado eficiente de los mismos. Mediante un programa de elementos finitos 3D no lineal, se modela un muro prefabricado con HUAPRF ensayado por otros investigadores en laboratorio para corroborar la herramienta numérica y el comportamiento estructural. También se realiza una comparativa entre los modelos numéricos de un muro de hormigón armado convencional, diseñados según la normativa vigente. Se analizan no solo los parámetros mecánicos, sino también costos y ventajas constructivas. Finalmente, se observa que el uso del HUAPRF permite una importante reducción del peso de los elementos, el diseño de estructuras más esbeltas y el uso de una menor cantidad de armadura; resultando en una alternativa interesante para la construcción de muros de sostenimiento.

**Keywords:** Retaining wall, Fiber reinforced concrete, Precast elements.

**Abstract.** The work consists of the numerical study of the mechanical behavior of retaining walls precast with Ultra High-performance Concrete Reinforced with Fiber (UHPCRF). The effects of the design variables are analyzed for an efficient dimensioning of the same. Using a nonlinear 3D finite element program, a precast wall is modeled with HUAPRF tested by other researchers in the laboratory to corroborate the numerical tool and the structural behavior. A comparison is also made between the numerical models of a conventional reinforced concrete wall, designed according to current regulations. Not only the mechanical parameters, but also costs and constructive advantages are analyzed. Finally, it is observed that the use of the UHPCRF allows a significant reduction in the weight of the elements, the design of more slender structures and the use of a smaller amount of reinforcement; resulting in an interesting alternative for the construction of retaining walls.

## 1 INTRODUCCIÓN

En una amplia gama de trabajos de ingeniería, principalmente de movimiento de suelo, resulta necesario materializar desniveles, pero no siempre se puede disponer del espacio necesario para contener los taludes que constituyen la transición entre las diferentes alturas. Son muy pocos los tipos de suelo que admiten la construcción de taludes verticales y, aunque lo hicieran, constituyen zonas con grandes posibilidades de falla debido a los muchos cambios que sufren las estructuras de suelo a lo largo de su vida. La solución para este problema son los muros de sostenimiento, también llamados muros de contención, que se encargan de soportar el empuje lateral de los suelos y de esta manera conseguir paramentos verticales estables.

Estas estructuras, principalmente consideradas del tipo lineal, suponen una importante inversión a la hora de ser realizadas. En la mayoría de los casos, el volumen de hormigón es importante, lo que lleva a grandes trabajos de instalación y controles de fisuración debido a la evaporación del agua producto del fragüe. Al tener que contener suelos, son obras que se encuentran principalmente en el exterior, sometidas a las inclemencias del clima.

Son estos los problemas que llevan a la necesidad de encontrar un material cuyas características permitan aumentar la eficiencia de los muros de sostenimiento y con esta manera ahorrar recursos de todo tipo. En los últimos años, las características propias de los hormigones reforzados con fibra y de los hormigones de altas prestaciones han permitido iniciar investigaciones sobre su utilización para la contención de suelos.

El aumento en la durabilidad de los elementos estructurales materializados con hormigón reforzado con fibra se debe al importante control de la fisuración, mecanismo por el cual ingresa los factores agresivos y afectan la integridad de las estructuras. Las fibras actúan interceptando las fisuras y retardando su propagación. Si hay suficiente cantidad y están uniformemente distribuidas, evitan que las microfisuras se unan, lo que aumenta la capacidad de deformación del material y la resistencia aparente de la matriz. El uso de fibras de acero en la cantidad correcta puede llevar incluso a un aumento de la resistencia de tracción que lleva a mejores comportamientos estructurales en flexión y a un empleo de menores cantidades de acero en la constitución del hormigón armado.

Rokugo, et al (2009) muestran cómo, al desarrollar un ancho de fisuras menor al del hormigón simple, el HUAPRF reduce los efectos de la carbonatación, la cual es significativamente mayor en las superficies fisuradas. Este control de la fisuración también trae aparejada una reducción en la corrosión del acero de armadura. En las experiencias realizadas por Liu (2017) se muestra como la adición de fibras de polipropileno, tendientes a una solución para reducir la permeabilidad en túneles, disminuye el número de fisuras y el ancho de las mismas en condiciones similares a la que se somete el hormigón simple.

En el trabajo de Nematollahi, et al (2014) se ensaya experimentalmente un muro en escala real de HUAPRF. Luego, se hace una comparativa entre muros del tipo Cantiléver, en el cual se muestra que el muro fabricado en HUAPRF tiene un peso total de 503,5 kg, mientras que el que se realiza en hormigón armado simple pesa 3.525,3 kg. Esta reducción de 7 veces el peso conduce a un abaratamiento de los costos de transporte e instalación, además de reducir la armadura y las dimensiones de las fundaciones. El control de fisuras permite prescindir de la armadura de retracción en las caras de la pantalla del muro, conservando solo una armadura mínima en los contrafuertes. En el trabajo de López, et al (2012) se realiza la comparación de dos muros tipo pantalla, concluyendo que el uso de HUAPRF lleva a un ahorro del 25% en la ejecución del muro y una reducción de 4 veces el tamaño. Finalmente, en el ámbito de la simulación computacional, Shirinzade y Ahmedov (2016) modelan numéricamente un muro de 6,88 m de altura ubicado en Gabala, Azarbaija. Al compararlo con una alternativa de hormigón reforzado con fibra observan una mejor distribución de los esfuerzos y la posibilidad de ahorrar

un 15% de armadura y hasta un 20% de hormigón.

En el siguiente trabajo se presentará un repaso de los principales beneficios que el agregado de fibras significa en las estructuras de sostenimiento. Se definirá un modelo matemático y se demostrará su idoneidad para futuros ensayos computacionales. Mediante el programa ANSYS Workbench se realizará una simulación numérica de un muro ensayado experimentalmente por otros autores con el fin de demostrar el potencial que tiene este material nuevo para ser incluido en futuros proyectos.

## 2 MODELO CONSTITUTIVO UTILIZADO

Para la reproducción del comportamiento del hormigón se utilizó un modelo elastoplástico. En dicho modelo la relación entre el tensor de tensiones  $\sigma$ , el tensor de deformaciones  $\epsilon$  y el tensor de deformaciones plásticas  $\epsilon^{pl}$  queda dada por

$$\sigma = C (\epsilon - \epsilon^{pl}). \quad (1)$$

Donde, C el tensor constitutivo elástico de cuarto orden para un material elástico lineal e isótropo. Dicho tensor queda determinado mediante los parámetros elásticos E y  $\mu$  que son el módulo de Young y el coeficiente de Poisson respectivamente. El incremento de las deformaciones plásticas se calcula mediante la siguiente regla de flujo

$$\dot{\epsilon}^{pl} = \dot{\lambda} \frac{\partial Q_{MW}}{\partial \sigma}. \quad (2)$$

Donde  $Q_{MW}$  es una función de potencial que se definirá posteriormente y  $\dot{\lambda}$  es el incremento del multiplicador plástico. El multiplicador plástico puede ser determinado mediante las condiciones de carga y descarga que se definen a continuación

$$f_{MW} \leq 0; \quad \dot{\lambda} \geq 0; \quad \dot{\lambda} f_{MW} = 0 \quad (3)$$

Donde  $f_{MW}$  es la función de fluencia. Dentro de dicha superficie el material tiene un comportamiento elástico lineal isótropo, al alcanzar la misma el material comienza a experimentar deformaciones plásticas, que se determinan con las expresiones definidas previamente.

La función de fluencia se define como:

$$f_{MW} = \frac{c_2}{c_3} \left[ \sqrt{\frac{2}{3}} I_1 + r \sqrt{2} J_2 \right] + 2J_2 - \frac{1}{c_3}, \quad (4)$$

Donde,  $I_1$  es el primer invariante de y  $J_2$  el segundo invariante del tensor desviador de tensiones S. En la Ecuación (4),  $c_2$ ,  $c_3$  y r dependen de parámetros del material y de las funciones de endurecimiento- ablandamiento:

$$c_2 = \frac{1}{\sqrt{6}} \left[ \frac{1}{R_c} - \frac{1}{R_b} + \frac{\overline{R_b} - \overline{R_t}}{R_c^2} \right], \quad c_3 = \frac{3}{2} \frac{1}{R_c}, \quad r = \frac{4(1-e^2)\cos^2\theta + (2e-1)^2}{2(1-e^2)\cos\theta + (2e-1)\sqrt{4(1-e^2)\cos^2\theta + 5e^2 - 4e}} \quad (5)$$

Con:

$$\overline{R_t} = R_t \Omega_{tc}, \quad \overline{R_c} = R_c \Omega_c, \quad \overline{R_b} = R_b \Omega_c; \quad \Omega_{tc} = \begin{cases} \Omega_t \kappa_c \leq \kappa_{cm} \\ \Omega_t \Omega_c \kappa_c > \kappa_{cm} \end{cases} \quad (6)$$

$$\epsilon = \frac{\overline{R_t}}{R_b} * \frac{\overline{R_b}^2 - \overline{R_c}^2}{R_c^2 - \overline{R_t}^2}, \quad e = \frac{1+\epsilon}{2-\epsilon}; \quad \cos 3\theta = \frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{\sqrt{J_2^3}} \quad (7)$$

Donde:  $R_c$ ,  $R_t$  y  $R_b$  son las resistencias a tracción, compresión y biaxial respectivamente. Y

$\Omega_c$  y  $\Omega_t$  son las funciones de endurecimiento-ablandamiento, las cuales dependen de  $\kappa_c$  y  $\kappa_t$  que son la variable de endurecimiento en compresión y tracción respectivamente.  $J_3$  es el tercer invariante del tensor desviador de tensiones  $S$  y  $\kappa_{cm}$  es un parámetro material que resulta un umbral en la función  $\Omega_c$  y se detallará más adelante. El incremento de las variables de endurecimiento puede calcularse como:

$$\dot{\kappa}_c = \frac{\alpha_c}{R_t} \sigma \cdot \dot{\varepsilon}^{pl}; \dot{\kappa}_t = \frac{\alpha_t}{R_t} \sigma \cdot \dot{\varepsilon}^{pl} \quad (8)$$

Donde,  $\sigma \cdot \dot{\varepsilon}^{pl}$  denota el producto escalar entre el tensor de tensiones y el incremento del tensor de deformaciones plásticas respectivamente.  $\alpha_c$  y  $\alpha_t$  son las funciones de peso en compresión y tracción respectivamente definidas como:

$$\alpha_c = 1 - \alpha_t; \tan \alpha = \frac{I_1}{\sqrt{J_2}}; \alpha_t = \begin{cases} 0 & \tan \alpha < -2 \\ \frac{1}{1+e^{-10 \tan \alpha}} & -2 \leq \tan \alpha \leq 2; \\ 1 & \tan \alpha > 2 \end{cases} \quad (9)$$

La función de endurecimiento-ablandamiento en compresión se define como:

$$\Omega_c = \Omega_{ci} + (1 - \Omega_{ci}) \sqrt{2 \frac{\kappa_c}{\kappa_{cm}} - \frac{\kappa_c^2}{\kappa_{cm}^2}}, \text{ para } \kappa_c < \kappa_{cm} \quad (10)$$

$$\Omega_c = 1 - (1 - \Omega_{cu}) \left( \frac{\kappa - \kappa_{cm}}{\kappa_{cu} - \kappa_{cm}} \right)^2, \text{ para } \kappa_{cm} < \kappa_c < \kappa_{cu} \quad (11)$$

Donde  $\kappa_{cm}$  y  $\kappa_{cu}$  son parámetros del material que corresponden al valor de la variable de endurecimiento en compresión en la transición de sus distintas ramas. En particular,  $\kappa_{cm}$  es el valor de la variable de endurecimiento en compresión en el pico de la función  $\Omega_c$  y se produce cuando  $\Omega_c = 1$ .  $\Omega_{ci}$  es el valor inicial de  $\Omega_c$ ,  $\Omega_{cu}$  es el valor correspondiente a  $\kappa_{cu}$  y  $\Omega_{cr}$  es el valor que se tiene cuando  $\kappa_c$  tiende a infinito.

La función de endurecimiento-ablandamiento en tracción se define como:

$$\Omega_t = e^{-\frac{\kappa_c}{a_t}}; a_t = \frac{g_{ft}}{R_t}; g_{ft} = \max \left( \frac{G_{ft}}{L_i}, \frac{R_t^2}{E} \right) \quad (12)$$

donde  $G_{ft}$  es la energía de fractura en tracción.  $L_i$  es la longitud efectiva del elemento y debe determinarse de manera que se cumpla la siguiente ecuación.

$$\int_0^\infty \Omega_t d\kappa_t = \frac{g_{ft}}{R_t} \quad (13)$$

Las funciones de endurecimiento-ablandamiento en tracción y compresión pueden apreciarse en la [Figura 5](#). Dichas funciones pueden ser obtenidas experimentalmente mediante ensayos uniaxiales de tracción y compresión.

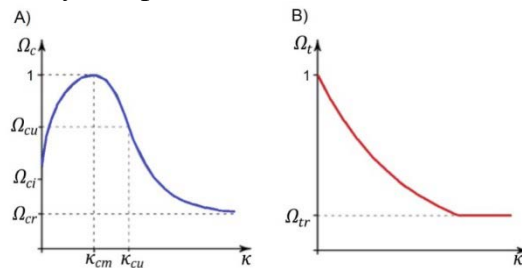


Figura 5. Funciones de endurecimiento-ablandamiento en (A) tracción y (B) compresión.

El modelo utiliza flujo no asociativo, por lo que la función de potencial se define como:

$$Q_{MW} = 2J_2 + B_g \sqrt{2J_2} + C_g \frac{1}{\sqrt{3}} I_1 \quad (14)$$

$$B_g = \frac{2\bar{R}_c \tan \Psi - \sqrt{2}\bar{R}_t}{\sqrt{3}(1 - \sqrt{2} \tan \Psi)} \quad (15)$$

$$C_g = \frac{B_g}{\sqrt{2}} + \frac{2\bar{R}_t}{\sqrt{3}} \quad (16)$$

Donde  $\Psi$  es el ángulo de dilatación.

A modo de resumen, se puede decir que el modelo cuenta con 3 juegos de parámetros que se deben definir:

- Parámetros Elásticos:  $E$  y  $\mu$ .
- Parámetros de la Superficie de Fluencia y Función Potencial:  $R_t$ ,  $R_c$ ,  $R_b$  y  $\Psi$ .
- Parámetros de las funciones de endurecimiento-ablandamiento:  $\kappa_{cm}$ ,  $\kappa_{cu}$ ,  $\Omega_{ci}$ ,  $\Omega_{cu}$ ,  $\Omega_{cr}$ ,  $\Omega_{tr}$  y  $G_{ft}$ .

### 3 CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS Y VALIDACIÓN DEL MODELO ANTE ENSAYOS DE FLEXIÓN

Con el fin de contar con un ensayo experimental de referencia para comparar con los resultados numéricos, se decidió utilizar el ensayo de resistencia a la flexión [ASTM C-1018 \(1997\)](#) realizado por [Nematollahi et al. \(2014\)](#) para la determinación de parámetros de diseño en su muro de sostenimiento. Dicho ensayo se realiza sobre una viga de sección cuadrada de 100 mm de altura y una longitud de 500 mm. La misma es cargada en su tercio central tal como se presenta en el esquema de la [Figura 6](#).

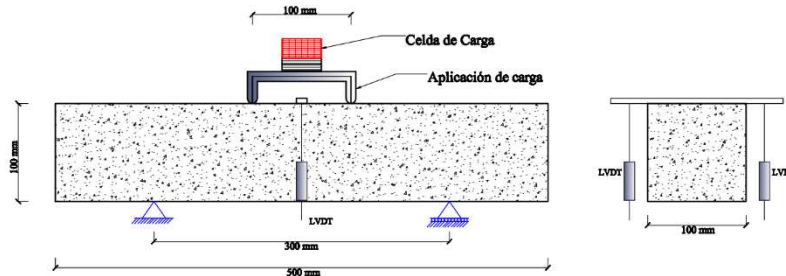


Figura. 6.-Esquema del ensayo a flexión.

[Nematollahi et al. \(2014\)](#) realiza el ensayo sobre probetas fabricadas con el mismo hormigón que utiliza para los muros prefabricados que estudia. Este material consiste en un hormigón de ultra altas prestaciones reforzado patentado (DURA®-UHPFRC) con 120 kg de fibra de acero por m<sup>3</sup> de hormigón (1,5 % en volumen). De la cantidad total de fibra, el 50% son fibras rectas de 20 mm de longitud con un diámetro de 0,2 mm. El otro 50% serán fibras con anclaje en los extremos, de 25 mm de longitud y 0,3 mm de diámetro. En ambos casos, la resistencia a tracción última del acero es de 2500 MPa. En la [Tabla 1](#) se presentan la proporción de los materiales utilizados en la mezcla y en la [Tabla 2](#) las características de las fibras utilizadas.

En la [Tabla 3](#) se presentan los parámetros elásticos, las resistencias y parámetros de las curvas de endurecimiento-ablandamiento que fueron seleccionados inicialmente por su idoneidad en otras investigaciones con HUAPRF. La resistencia a la compresión fue obtenida de los ensayos a compresión realizados por [Nematollahi et al. \(2014\)](#) y a la resistencia a compresión biaxial se le asignó un valor 20% mayor que la uniaxial.

Componentes	
Premezcla DURA®-UHPFRC	2100 kg/m <sup>3</sup>
Superfluidificante	40 kg/m <sup>3</sup>
Fibra de acero Tipo I	60 kg/m <sup>3</sup>
Fibra de acero Tipo II	60 kg/m <sup>3</sup>
Agua libre	144 kg/m <sup>3</sup>
Humedad	3%
Proporción Agua/Cemento buscada	0,15
Vació de aire total	< 4%

Tabla. 1.- Materiales usados en el HUAPRF ensayado.



Tipo	Identif.	$l_f$ [mm]	$d_f$ [mm]	$\lambda$	$\sigma_{fu}$ [MPa]	Forma de la fibra
I	SS0220	20	0,2	100	2500	
II	EH0325	25	0,3	83,3	2500	

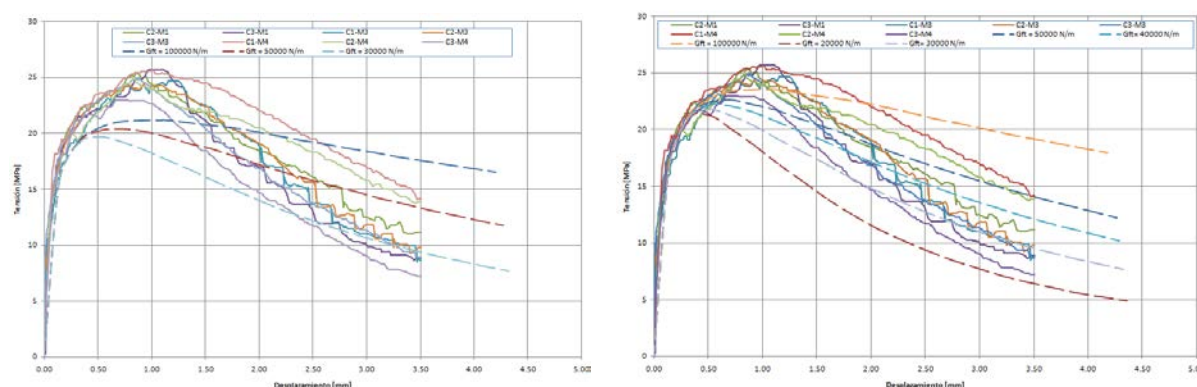
Tabla. 2.-Carcterísticas de las fibras utilizadas.

$E$ [Mpa]	$\mu$	$R_c$ [Mpa]	$R_t$ [Mpa]	$R_b$ [Mpa]	$\Psi$ [°]	$\kappa_{cm}$	$\kappa_{cu}$	$\Omega_{ci}$	$\Omega_{cu}$	$\Omega_{cr}$	$G_{ft}$ [N/m]	$\Omega_{tr}$
41000	0,2	148	8	178	10	0,001	0,002	0,33	0,7	0,05	50000	0,05

Tabla 3: Parámetros materiales iniciales del HUAPRF.

En la Figuras 7 se presentan los gráficos de tensión en función del desplazamiento vertical de la viga para resistencias de 8 y 9 MPa respectivamente. En línea llena se presentan los resultados de los ensayos experimentales y en líneas de trazo, los resultados del modelo numérico. Para cada resistencia se presentan diferentes energías de fractura con el fin de analizar cuál de los pares de parámetros ajusta mejor a la nube de puntos experimentales.

Al analizar la totalidad de los resultados experimentales se puede concluir que la curva correspondiente a  $f_t = 8$  MPa y de  $G_{ft} = 50000$  N/m, si bien no alcanza exactamente el pico de los ensayos, ajusta mejor la rama descendente o de ablandamiento con la zona inferior de los resultados experimentales. Para  $f_t = 9$  MPa y las energías de fractura  $G_{ft} = 30000$  N/m,  $G_{ft} = 40000$  N/m y  $G_{ft} = 50000$  N/m se presentan un buen ajuste con los ensayos experimentales.

Figura 7: Gráfico Tensión vs Desplazamiento para: Izquierda  $f_t = 8$  MPa, Derecha  $f_t = 9$  MPa .

#### 4 MODELACIÓN DE UN MURO DE HUAPRF

El muro resultante del proceso de diseño realizado por [Nematollahi et al. \(2014\)](#) consiste en dos placas perpendiculares de 30 mm y 40 mm de espesor, que constituyen la pantalla y la base respectivamente. Solo los contrafuertes se encuentran armados con armadura ADN420, disponiendo, por cada contrafuerte, en vertical una barra de 20 mm y en horizontal 2 barras de 16 mm. La geometría del muro se puede ver en la [Figuras 8](#).

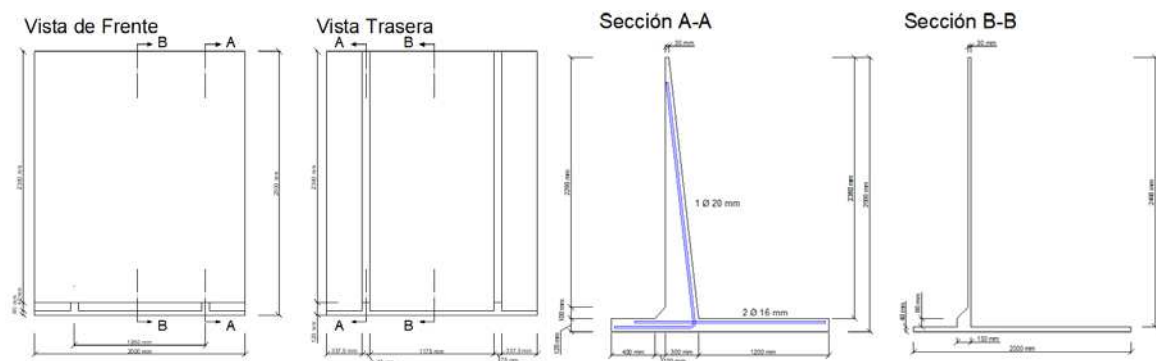


Figura 8: Geometría del muro a modelar.

El ensayo a flexión se realizó siguiendo los lineamientos del código [BS EN 15258 \(2008\)](#) particularmente en su anexo C. El mallado adoptado se observa en la [Figura 9](#), utilizando un total de 5512 elementos hexaédricos y 3644 elementos de barra. Para el análisis numérico de esta estructura se utilizaron los parámetros de la [Tabla 3](#), adoptando adicionalmente  $f_t = 8 \text{ MPa}$  y  $G_{ft} = 50000 \text{ N/m}$ .

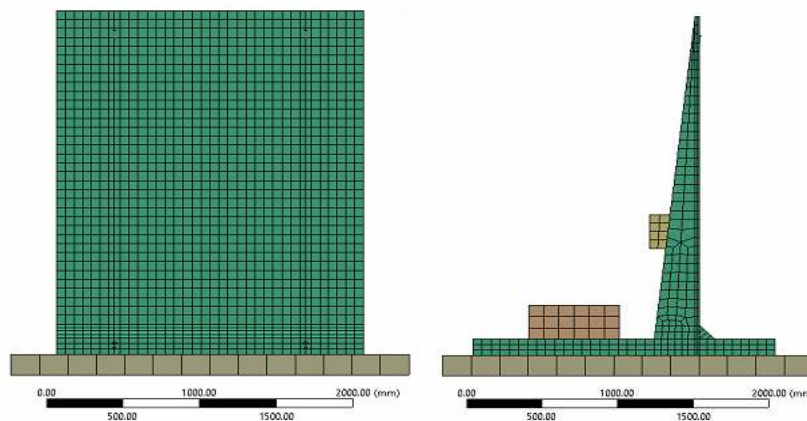


Figura 9: Mallado final del conjunto.

Para analizar el mecanismo de falla del conjunto, se pide al modelo un mapa de deformaciones plásticas equivalentes que indica de forma cualitativa la localización de las fisuras. Se observa una fisuración concentrada en la unión entre los contrafuertes de la base y la pantalla. En la [Figura 10](#) se pudo apreciar como las deformaciones plásticas del modelo coinciden con la fisuración experimentada por el modelo a escala real desarrollada por [Nematollahi et al. \(2014\)](#) y lleva a asegurar que el modelo representa de forma correcta el fenómeno. Cabe aclarar que la falla en esta unión se debe a la concentración de tensiones de tracción en el contrafuerte debido a la flexión experimentada.

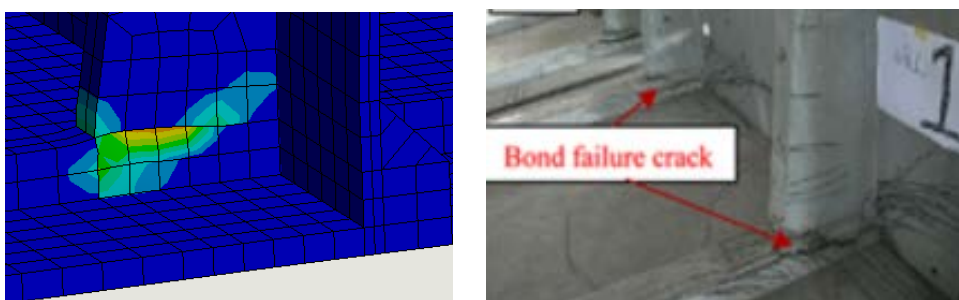


Figura 10: Fisuración desarrollada por el modelo numérico (izq.) y por el experimental (der.).

Se solicitan al modelo los desplazamientos de un nudo a una altura de 2430 mm medidos desde la base, que se ajustan a la ubicación de los LVDT del modelo experimental. Además, se pide la fuerza que equivale a los desplazamientos impuestos en el contrafuerte para cada paso de carga. En la Figura 11, para el modelo, se puede apreciar una rama de ablandamiento propia de los hormigones reforzados con fibras y una importante energía de deformación, representada por el área debajo de las curvas. Gracias a esta característica, el muro adquiere una ductilidad que le permite desarrollar importantes deformaciones sin incurrir en un cuadro de fisuración más pronunciado. Se observa que el muro desarrolla una carga de falla de 131,53 kN, lo que conduciría a un momento resistente de 104,3 kNm en la unión de la pantalla con la base. Este permite concluir que la estructura analizada cumple sobradamente las exigencias para las que fue diseñado.

En la Figura 11 se realiza una comparativa entre la curva fuerza-desplazamiento experimental (en línea llena) y la generada por el modelo numérico (en línea de trazos) para confirmar el correcto ajuste del mismo para el comportamiento estructural del elemento analizado. Así, se observa que el modelo numérico no reproduce la posición del pico en el ensayo del muro pero si el valor de dicho pico. Esto, sumado a un cuadro de deformaciones plásticas coincidente con el cuadro de fisuración experimental y a una correlación del material en el ensayo a flexión, permite asegurar que la herramienta informática reproduce correctamente el comportamiento no lineal y los beneficios en la ductilidad del HUAPRF aplicado a muros de sostenimiento.

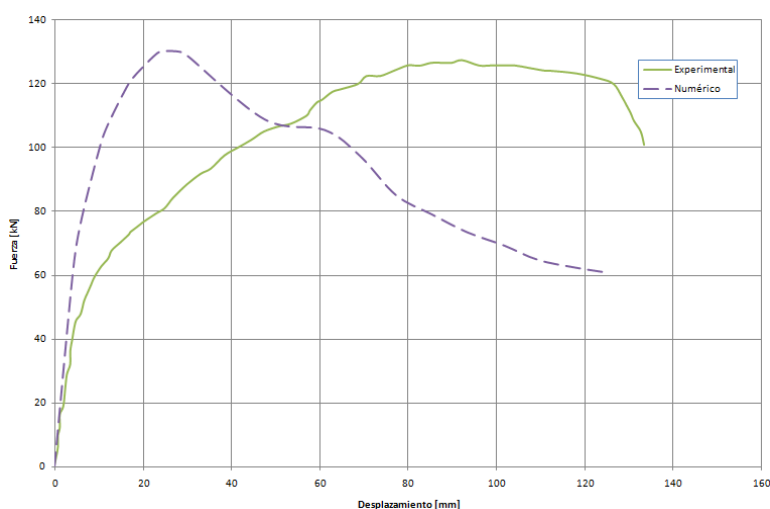


Figura 11. Comparación en el comportamiento Fuerza-Desplazamiento para el modelo experimental y el numérico.



## 5 COMPARACIÓN DE MUROS DE SOSTENIMIENTO

Para realizar un estudio comparativo entre muros de sostenimiento se procedió a realizar el diseño de un muro materializado en hormigón convencional. Dicho diseño se basó en la necesidad de obtener un muro que resista el mismo momento flector al que se encuentra sometido el muro de HUAPRF y que se obtuvo del modelo numérico (104,3 kNm). También se definió que ambos muros tengan un ancho de 2 m y una altura total de 2,5 m. En la [Figura 12](#) se muestran las dimensiones del muro de hormigón convencional y la distribución de la armadura.

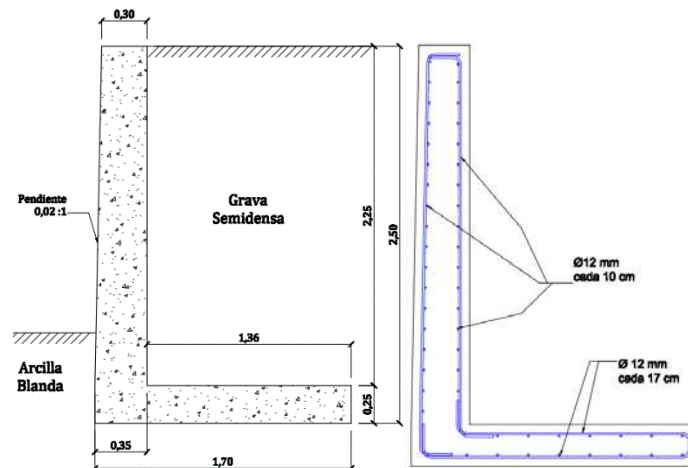


Figura 12: Muro de hormigón convencional planteado.

Se observa que la principal diferencia entre ambos muros son las dimensiones de los mismos. La aplicación de reglamentos más desarrollados, como por ejemplo el [JSCE \(2006\)](#), permite considerar el comportamiento dúctil y con mejores prestaciones ante la fisuración del hormigón con fibra. Así, se consigue un elemento estructural de 1,04 tn frente a uno de 5,6 tn fabricado en HC. La filosofía de diseño a flexión es la misma para ambos materiales, con la diferencia de que el uso de HUAPRF permite considerar la resistencia a la tracción del hormigón. Esto, sumado a que se utiliza un hormigón de alta resistencia, resulta en una menor armadura de acero (tanto resistente como para el control de fisuración).

Para comparar económicamente ambos muros se debe tener en cuenta que en Argentina no se producen HUAPRF y que la utilización de fibras de acero es escasa. Se observa la necesidad de una amplia gama de aditivos en la masa de hormigón para poder adquirir las propiedades deseadas en el HUAPRF. Además, se requiere de cementos de alta resistencia y una mano de obra calificada para el trabajo de elaboración en fábrica; lo que aumenta el costo de la alternativa en HUAPRF. Los precios utilizados en la Tabla 4 se presentan en pesos considerando la cotización del dólar oficial del Banco Nación al día 18 de junio de 2023 (\$259).

Elemento Estructural	PU [\$/m <sup>3</sup> ]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Precio Total
Muro de Sostenimiento de HUAPRF	248491,58	1,2718	\$ 316 031,59
Muro de Sostenimiento Hormigón H-30	134147,57	2,2986	\$ 308 351,60

Tabla 4. Comparación económica de los muros analizados.

## 6 CONCLUSIONES

Del análisis numérico se observa que, si bien el método no reproduce correctamente la posición del pico en la gráfica fuerza-desplazamiento, logra reproducir su valor. Esto, sumado a un cuadro de deformaciones plásticas coincidente con el cuadro de fisuración experimental, permite asegurar que la herramienta informática representa correctamente el comportamiento no lineal y los beneficios en la ductilidad del HUAPRF aplicado a muros de sostenimiento.

Al comparar la solución convencional con la de HUAPRF se observa que el precio final de los dos tipos de muros es aproximadamente igual. Esto es así, ya que, si bien el HUAPRF requiere de mayor tecnología para su fabricación, se pueden alcanzar dimensiones más esbeltas que utilizan mucho menos material. Además, se consigue un importante ahorro en las armaduras resistentes y de fisuración. Si se considera que el muro de HC es 5 veces más pesado que su contraparte en HUAPRF, se puede concluir que habrá un ahorro equivalente en costos de transporte e instalación; volviendo al muro de HUAPRF en la opción más económica si se considera la totalidad de la obra.

## 7 AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen al proyecto PIUNT E623 y a la asociación cooperadora de la FACET-UNT.

## REFERENCIAS

- ASTM C-1018 (1997). Standard test method for flexural toughness and first crack strength of fiber reinforced concrete (using beam with third point loading), American Society for Testing and Materials (ASTM) Standards, United States
- BS EN 15258 (2008). Precast concrete products-Retaining wall elements, British Standards, UK.
- JSCE (2006). Recommendations for design and construction of ultra high strength fiber reinforced concrete structures (Draft), JSCE Guideline for Concrete No. 9, Concrete Committee of Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Japan.
- Liu, X. (2017). Analysis on the Anti-cracking and Anti-permeability Performance of Polypropylene Fiber-Reinforced Concrete in Subway Retaining Structure, CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, VOL. 59, p. 337-342.
- López, J.A., Serna, P., Camacho, E., (2012), Structural Design and Previous Tests for a Retaining Wall Made with Precast Elements of UHPFRC, G.J. Parra-Montesinos, H.W. Reinhardt, and A.E. Naaman (Eds.): HPFRCC 6, RILEM, 437–444.
- Nematollahi, B., Voo, Y.L., Saifulnaz R. (2014), Structural Behavior of Precast Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) Cantilever Retaining Walls: Part I - Analysis and Design Procedures and Environmental Impact Calculations (EIC), KSCE Journal of Civil Engineering, DOI 10.1007/s12205-014-0411-8
- Rokugo, K., Kanda, T., Yokota, H., Sakata N. (2009). Applications and recommendations of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracking (HPFRCC) in Japan. En *Materials and Structures* 42:1197–1208.
- Shirinzade, Í.N, Ahmedov, N.M., (2016), Research of ways of concrete constructive durability increase in modern transport constructions, UDK 666.982, НАУКА ТА БУДІВНИЦТВО 2(8).