

MODELO DE ARRANCAMIENTO DE FIBRAS DE ACERO DEPENDIENTE DE LA VELOCIDAD DE CARGA

STRAIN RATE DEPENDENT PULL-OUT MODEL FOR STEEL FIBERS

Paula L. Argañaraz, Facundo Isla y Bibiana Luccioni

*Instituto de Estructuras, FACET, UNT, Av. Independencia 1800, 4000 S.M. de Tucumán, Argentina,
plarganarazsaenz@herrera.unt.edu.ar, <http://www.facet.unt.edu.ar/iest/>*

CONICET, Godoy Cruz 2290, C1425FQB CABA, Argentina, <http://www.conicet.gov.ar/>

Palabras Clave: arrancamiento de fibras, fibras de acero, modelo de arrancamiento, velocidad de deslizamiento, factor de amplificación dinámico.

Resumen. El arrancamiento de las fibras es el principal responsable de la tenacidad de los hormigones reforzados con fibras (HRF) por lo que resulta indispensable la adecuada simulación de este mecanismo en los modelos dinámicos de HRF. Los resultados experimentales muestran que el arrancamiento de fibras de acero embebidas en matrices de hormigón presenta sensibilidad a la velocidad de carga. En este trabajo se presenta una extensión al caso dinámico de un modelo ya desarrollado para arrancamiento estático de fibras. Se incluyen los efectos inerciales y se propone una nueva ley de variación de las fuerzas friccionales entre la fibra y la matriz en la cual los parámetros son dependientes de la velocidad de carga. Los mismos se calibran en base a resultados experimentales obtenidos de ensayos de arrancamiento de fibras lisas a distintas velocidades de carga que abarcan desde carga cuasi estática hasta cargas de impacto. El trabajo se completa con simulaciones de arrancamiento de fibras con gancho a distintas velocidades y comparación con resultados experimentales que muestran la capacidad del modelo de arrancamiento desarrollado. Los resultados muestran que los efectos inerciales son prácticamente despreciables frente a la variación de las propiedades de la interfaz con la velocidad de carga.

Keywords: fibers pull-out, steel fibers, pull-out model, sliding rate, dynamic increase factor.

Abstract. Since fiber pull-out is the main responsible for the toughness of fiber-reinforced concrete (FRC), it is important to properly simulate this mechanism in dynamic HRF models. Available experimental results show that the pull-out of steel fibers embedded in concrete matrices presents sensitivity to the loading speed. A dynamic extension of a model already developed for static fiber pull-out is presented in this paper. The inertia effects are included and a new law for the variation of the frictional forces between the fiber and the matrix in which the parameters are dependent on the loading rate is proposed. The model parameters are calibrated based on experimental results obtained from pull-out tests of smooth fibers at different loading rates, from quasi-static load to impact load. The paper is completed with the simulation of hooked end fibers pull-out at different loading rates and comparison with experimental results that show the capacity of the developed pull-out model. The results show that the inertial effects are practically negligible compared to the variation of the interface properties with loading rate.

1 INTRODUCCIÓN

El refuerzo del hormigón con fibras de acero mejora su comportamiento post-fisuración. El HRF resiste las fuerzas de tracción a través de la acción conjunta de la matriz y las fibras. Una vez que se produce una fisura, las fibras unen la misma y resisten su crecimiento y propagación. El comportamiento del HRF en tracción, particularmente su respuesta post-fisuración, depende directamente de la interacción entre la fibra y la matriz durante la extracción de la fibra y presenta sensibilidad a la velocidad de deformación. Muchos investigadores atribuyeron esa sensibilidad a la sensibilidad a la velocidad de deslizamiento de las fuerzas de interacción en la interfaz entre la fibra y la matriz (Park et al. 2019). En general, la sensibilidad a la velocidad de carga se expresa a través del factor de incremento dinámico (DIF) que mide la relación entre la resistencia u otra propiedad dinámica y la correspondiente propiedad estática.

Algunos autores que realizaron ensayos de arrancamiento de fibras de acero hasta velocidades de arrancamiento de 25 mm/s, observaron un comportamiento independiente de la velocidad de carga, lo cual puede atribuirse a las bajas velocidades alcanzadas en los ensayos (Gokoz y Naaman, 1981; Abu-Lebdeh et al. 2010; Xu et al. 2016; Nieuwoudt y Boshoff, 2017). Por el contrario, otros investigadores que ensayaron con velocidades mayores concluyeron que la carga de arrancamiento de fibras lisas en matrices de alta resistencia aumenta a medida que aumenta la velocidad de carga (Tai et al. 2016; Xu et al. 2016; Park et al. 2018; Tai y El-Tawil, 2017; Yoo et al. 2019a) y que la sensibilidad a la velocidad de carga se vuelve significativa a velocidades de carga de impacto (1800 mm/s) (Tai et al. 2016; Yoo et al. 2019a).

Por otro lado, se encontró que la sensibilidad a la velocidad de carga disminuye con el aumento del diámetro de la fibra (Tai et al. 2016) y con el aumento de la longitud embebida debido al que el confinamiento del hormigón es menor en el caso de las fibras más cortas (Cao et al. 2019). La resistencia máxima al arrancamiento es mayor en las fibras con ganchos que en las rectas. La geometría de la fibra afecta significativamente el camino de la fisura en la interfaz y la velocidad de propagación de la fisura y, en consecuencia, incide en la sensibilidad a la velocidad de arrancamiento. Algunos autores encontraron que la resistencia al arrancamiento de las fibras con gancho es menos sensible a la velocidad de carga que la de las fibras lisas (Tai et al, 2016; Tai y El-Tawil, 2017), mientras que otros autores observaron mayor sensibilidad a la velocidad de carga en las fibras con ganchos que en las lisas (Xu et al. 2016).

Aunque algunos autores obtuvieron DIFs similares para las cargas de arrancamiento de fibras de distintas matrices (Tai et al. 2016; Xu et al. 2016), otros autores observaron que la sensibilidad de la carga pico de arrancamiento aumenta con la resistencia de la matriz (Tai y El-Tawil, 2017; Park et al. 2018).

Se observó también un aumento de la energía de arrancamiento con el aumento de la velocidad de carga en fibras lisas y con ganchos (Tai et al. 2016; Tai y El-Tawil, 2017; Cao et al. 2019). Los resultados experimentales evidencian que la energía de arrancamiento es más sensible a la velocidad de deformación que el pico de la carga de arrancamiento (Cao et al. 2019). Según Yoo et al. (2019b) la amplificación dinámica de la energía es mayor en las fibras lisas que en las con ganchos, mientras que Xu et al. (2016) mostraron lo contrario.

Algunos investigadores estudiaron analíticamente los efectos inerciales en problemas de arrancamiento de fibras bajo la hipótesis de una interfaz fibra-matriz friccional. Sin considerar la energía de despege (Sridhar et al 2003, Cox et al 2001). Sridhar et al. (2003), derivaron soluciones analíticas para una fuerza de arrancamiento que aumenta linealmente con el tiempo y apoyaron sus soluciones mediante un modelo de elementos finitos de tensión plana con un modelo de zona cohesiva para la interfaz matriz-fibra. Cox et al. (2001) consideraron la interfaz fibra-matriz con fricción independiente de la velocidad y sin incluir la energía de arrancamiento. La precisión de esta aproximación depende, no solo de que la longitud de la zona de

deslizamiento sea mayor que el diámetro de la fibra, sino también de que la energía de despegue sea distinta de cero. [Azzam \(2016\)](#) propuso un modelo analítico para el arrancamiento de fibras bajo cargas dinámicas considerando un modelo constitutivo de daño elástico para la interfaz fibra-matriz que permite obtener soluciones analíticas cerradas para un desplazamiento de arrancamiento armónico. [Nieuwoudt y Boshoff \(2017\)](#) plantearon un modelo complejo que requiere un gran número de parámetros para simular el comportamiento dependiente del tiempo del HRF con una sola fibra de acero. El modelo depende del tipo y geometría de la fibra, longitud embebida, ángulo de inclinación de la fibra, composición de la matriz y método de preparación del espécimen. Para modelar el comportamiento se agregó un componente dependiente del tiempo en serie con el modelo analítico desarrollado por [Cunha et al. \(2010\)](#) que tiene un componente no lineal y un componente viscoelástico.

En este trabajo se presenta un modelo para arrancamiento dinámico de fibras en el cual se incluyen los efectos inerciales y se propone una ley de variación de las fuerzas friccionales entre la fibra y la matriz en el cual los parámetros son dependientes de la velocidad de carga.

2 MODELO PARA ARRANCAMIENTO DINAMICO DE FIBRAS

El modelo de arrancamiento dinámico de fibras se basa en el modelo de arrancamiento estático de fibras propuesto por [Isla \(2014\)](#), el cual parte de los modelos de [Naaman et al. \(1991\)](#) y [Chanvillard \(1999\)](#).

2.1. Modelo de deslizamiento

Se consideran las siguientes hipótesis: (1) La sección transversal de la fibra es uniforme en toda la longitud de la fibra. (2) Las secciones permanecen planas y normales al eje longitudinal después de un cambio de curvatura. (3) Solo se considera la componente normal de la deformación en la dirección del eje de la fibra. El resto de las componentes de deformación se desprecian. (4) El eje de la fibra está contenido en un plano. (5) La dirección del deslizamiento es tangente al eje de la fibra en el punto donde sale de la matriz. (6) El comportamiento del material de la fibra es elástico perfectamente plástico.

Partiendo de la forma variacional de la ecuación de movimiento:

$$\int_V \tau_{ij} \delta \varepsilon_{ij} dV = \int_{S^\sigma} T_i^p \delta u_i dS + \int_V X_i \delta u_i dV - \int_V \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \delta u_i dV \quad (1)$$

donde el incremento desplazamiento δu_i es triplemente diferenciable en el dominio V , cumple con las condiciones cinemáticas en S^u y es arbitrario en V incluso sobre el resto de la superficie exterior S^σ donde están prescritas las fuerzas de superficie T_i^p , τ_{ij} y ε_{ij} que representan las componentes del tensor de tensiones de Cauchy y del tensor de pequeñas deformaciones respectivamente y ρ es la densidad. La única componente del desplazamiento tiene la dirección axial de la fibra. Despreciando la deformación axial del eje de la fibra, el incremento de desplazamiento de un punto en las coordenadas locales (s,r) de la fibra correspondiente al incremento de deslizamiento del extremo de la fibra $\delta\Delta$ viene dado por:

$$\delta u(s,r) = \delta\Delta + \int_0^s r \frac{\partial C}{\partial \Delta} \delta\Delta ds \quad (2)$$

donde $\delta\Delta$ es la variación del deslizamiento del extremo de la fibra embebida en la coordenada r , la función $C(s)$ define la curvatura del canal de la fibra en las coordenadas locales de la fibra. Como las fuerzas volumétricas X_i son nulas, integrando sobre la sección transversal de la fibra y teniendo en cuenta que la Ec. (2) debe verificarse para cualquier $\delta\Delta \neq 0$ se llega a:

$$\begin{aligned}
P = & \int_L M \frac{\partial C}{\partial \Delta} ds + \int_L T_{fm} ds + \\
& + \int_L \rho \left\{ \left[A + I \left(\int_0^s \frac{\partial C}{\partial \Delta} ds \right)^2 \right] \frac{\partial^2 \Delta}{\partial t^2} + I \left(\int_0^s \frac{\partial C}{\partial \Delta} ds \right) \left(\int_0^s \frac{\partial^2 C}{\partial \Delta^2} ds \right) \left(\frac{\partial \Delta}{\partial t} \right)^2 \right\} ds
\end{aligned} \quad (3)$$

donde P es la fuerza de arrancamiento, M es la resultante del momento flector seccional (Isla, 2014), T_{fm} es la resultante de las fuerzas tangenciales por unidad de longitud, A es el área de la sección transversal e I es el momento de inercia. El tercer término del segundo miembro de la Ec. (3) representa la contribución de las fuerzas de inercia a la fuerza de arrancamiento.

Isla (2014) propone la siguiente expresión para la fuerza tangencial actuando en la interfaz fibra-matriz:

$$T_{fm}(s) \begin{cases} = t_{fm1}(s) & \text{si } C(s) = 0 \text{ ó } C(s + \Delta) \neq 0 \\ = t_{fm2}(s) & \text{si } C(s) \neq 0 \text{ y } C(s + \Delta) = 0 \\ = 0 & \text{si } s + \Delta > L_e \end{cases} \quad (4)$$

donde L_e es la longitud embebida, t_{fm1} , definida mediante la Ec. (5), considera la contribución del efecto *misfit* (Pinchin y Tabor, 1978; Naaman et al. 1991), el efecto friccional debido al cambio de dirección del eje de la fibra (Chanvillard, 1999) y el efecto friccional debido al confinamiento provisto mediante el estado tensional de la matriz. t_{fm2} tiene en cuenta la resistencia friccional residual al arrancamiento debido a las irregularidades geométricas que quedan en el eje de la fibra debido al enderezamiento incompleto de las partes originalmente curvas.

$$t_{fm1}(s) = \tau_d \psi + N(s) C(s + \Delta) f + \langle -\tilde{\sigma} \rangle \psi f \quad (5)$$

El primer término de la Ec. (5) representa la contribución del efecto *misfit* el cual se evalúa a través de la tensión tangencial en la interfaz τ_d y se analiza en la sección 2.3. El segundo término se relaciona con el cambio de dirección de la fuerza axial $N(s)$. El tercer término representa la fuerza friccional generada mediante la presión de la matriz sobre la fibra $\tilde{\sigma}$ debido al estado tensional del compuesto. Además f es el coeficiente de fricción dinámica y ψ es el perímetro de la fibra.

Los tramos curvos de la fibra se enderezan parcialmente durante el deslizamiento, presentando irregularidades en la geometría del eje longitudinal que generan tensiones de fricción adicionales en la interfaz fibra-matriz. Se denomina fuerza residual de arrancamiento P_{rd} a la resultante de las tensiones adicionales de fricción originadas por estas irregularidades. Durante el deslizamiento, la matriz circundante se rompe debido a las irregularidades de las fibras aumentando el diámetro del canal. Esta rotura de la matriz circundante junto a la pérdida de contacto en la interfaz de la zona cóncava de los tramos parcialmente enderezados, anulan el efecto *misfit* y el efecto del estado tensional de la matriz.

Se considera que las fuerzas tangenciales t_{fm2} , están uniformemente distribuidas en los tramos curvos parcialmente enderezados. La contribución de cada segmento es proporcional a su curvatura inicial $C(s)$.

$$t_{fm2}(s) = \frac{P_{rd} C(s)}{\left(\sum_{i=1}^n L_{ci} \right) \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \right)} \quad (6)$$

donde n es el número de tramos curvos, L_{ci} y C_i son la longitud y curvatura de cada tramo curvo respectivamente. La fuerza residual P_{rd} puede ser obtenida a partir de resultados

experimentales adoptando el valor de carga correspondiente al deslizamiento por el cual el gancho inicial comienza a salir de la matriz.

2.2. Tensión tangencial en la interfaz fibra-matriz

En este trabajo se propone una nueva forma de definir la tensión tangencial en la interfaz τ_d que además incluye la dependencia de la velocidad de arrancamiento. En el caso estático, si se supone que la tensión tangencial τ_d es uniforme a lo largo de la fibra, la función $\tau_d(\Delta)$ se puede obtener a partir de la curva de arrancamiento $P(\Delta)$ experimental de una fibra recta como:

$$\tau_d(\Delta) = \frac{P(\Delta)}{\pi d_f(L_e - \Delta)} \tag{7}$$

donde d_f es el diámetro de la fibra. Esta función se representa esquemáticamente en la **Figura 1** que muestra un comportamiento típico. La forma de la función $\tau_d(\Delta)$ depende no sólo de la geometría de la fibra que interviene en la Ec. (7) sino también del material de la fibra, de la composición y de las propiedades mecánicas de la matriz de hormigón y varía con la velocidad de deformación.

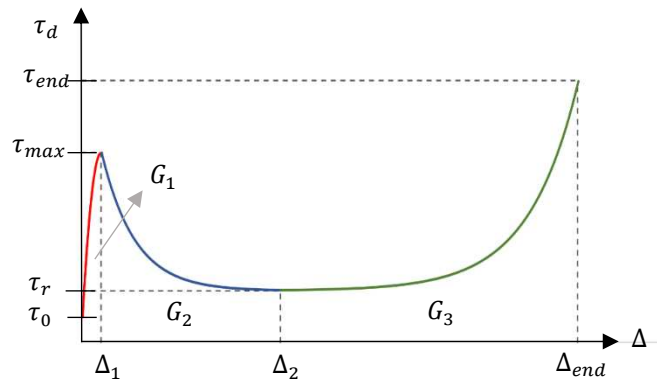


Figura 1: Variación de la resistencia tangencial en la interfaz fibra matriz

La curva representada en la **Figura 1** se puede aproximar mediante las siguientes ecuaciones:

$$0 \leq \Delta \leq \Delta_1 \quad \tau_d = \left(\frac{3(\tau_{max} + \tau_0)}{\Delta_1^2} - \frac{6 G_1}{\Delta_1^3} \right) \Delta^2 + \left[\frac{6 G_1}{\Delta_1^2} - 2 \frac{(\tau_{max} + 2\tau_0)}{\Delta_1} \right] \Delta + \tau_0 \tag{8}$$

$$\Delta_1 \leq \Delta \leq \Delta_2 \quad \tau_d = \tau_{max} + \frac{\tau_r - \tau_{max}}{e^{-\alpha(\Delta_2 - \Delta_1)} - 1} [e^{-\alpha(\Delta - \Delta_1)} - 1] \tag{9}$$

$$\Delta_2 \leq \Delta \leq \Delta_{end} \quad \tau_d = \tau_r + \frac{\tau_{end} - \tau_r}{e^{\beta(\Delta_{end} - \Delta_2)} - 1} (e^{\beta(\Delta - \Delta_2)} - 1) \tag{10}$$

α y β son constantes que se pueden obtener resolviendo las siguientes ecuaciones no lineales:

$$0 = - \frac{G_2 - \tau_{max} (\Delta_2 - \Delta_1)}{(\tau_r - \tau_{max})} - \frac{1}{\alpha} - \frac{(\Delta_2 - \Delta_1)}{e^{-\alpha(\Delta_2 - \Delta_1)} - 1} \tag{11}$$

$$0 = - \frac{G_3 - \tau_r (\Delta_{end} - \Delta_2)}{(\tau_{end} - \tau_r)} + \frac{1}{\beta} - \frac{(\Delta_{end} - \Delta_2)}{e^{\beta(\Delta_{end} - \Delta_2)} - 1} \tag{12}$$

En el caso particular que $\tau_r = \tau_{max}$ la tensión tangencial se obtiene como:

$$\Delta_1 \leq \Delta \leq \Delta_{end} \quad \tau_d = \tau_{max} + \frac{\tau_{end} - \tau_{max}}{e^{\beta(\Delta_{end} - \Delta_1)} - 1} (e^{\beta(\Delta - \Delta_1)} - 1) \quad (13)$$

Los valores de las tensiones tangenciales τ_o , τ_{max} , τ_r y τ_{end} , de los deslizamientos Δ_1 , Δ_2 y Δ_{end} y de las energías G_1 , G_2 y G_3 se indican en la [Figura 1](#).

3 EJEMPLOS NUMERICOS

3.1 Introducción

El modelo de arrancamiento dinámico se programó en FORTAN como una extensión del algoritmo discreto desarrollado por [Isla \(2014\)](#) y se simuló numéricamente ensayos de arrancamiento de una sola fibra embebida en una matriz de hormigón a distintas velocidades de carga que corresponden a ensayos experimentales realizados por [Xu et al. \(2016\)](#), [Tai et al. \(2016\)](#) y [Tai et al. \(2017\)](#). En la [Tabla 1](#), se detallan las propiedades del hormigón y de las fibras utilizadas en las simulaciones. Las fibras lisas de 0.38 mm de diámetro ensayadas experimentalmente fueron obtenidas cortando el gancho de las fibras de eje curvo.

	Xu et al. 2016		Tai et al. 2016		Tai et al. 2017
Módulo Elast. del Hormigón [MPa]	65400.00		63750.00		63750.00
Resistencia Comp. Hormigón [MPa]	194.00		184.90		184.00
Resistencia Tracc. Hormigón [MPa]	13.57		12.93		12.87
Diámetro de la fibra d_f [mm]	0.20	0.38	0.20	0.40	0.38
Longitud de la fibra [mm]	13.00	30.00	25.00	25.00	30
Longitud embebida [mm]	6.00		6.00		6.00
Módulo de Elast. Fibra [GPa]	200.00		200.00		200.00
Tensión de Rotura Fibra [MPa]	2600.0	2900.0	2860.0	1850.0	2900.0

Tabla 1: Propiedades del hormigón y de las fibras

Las pruebas numéricas realizadas mostraron que la contribución de los términos de inercia resulta despreciable para las velocidades de arrancamiento estudiadas experimentales que llegan a 1800 mm/s. Teniendo en cuenta este resultado, la sensibilidad a la velocidad de arrancamiento de fibras lisas se debe casi exclusivamente a la variación de los parámetros que definen el comportamiento de la interfaz fibra-matriz. Dicha variación puede determinarse entonces directamente a partir de las curvas de arrancamiento de fibras lisas obtenidas de ensayos con distintas velocidades de carga.

Los parámetros que evidencian mayor incidencia en la respuesta son τ_{max} , τ_r , τ_{end} , G_2 y G_3 . A modo ilustrativo, en la [Figura 2](#) se muestra la variación de dichos parámetros con la velocidad de arrancamiento obtenida a partir de los resultados experimentales de arrancamiento de fibras lisas de [Tai et al. \(2016\)](#). La velocidad de arrancamiento varía entre el caso el caso cuasi-estático (0.018 mm/s) hasta velocidad de impacto (1800 mm/s). Se observa que, en general, el DIF puede aproximarse con una función lineal del logaritmo de la velocidad de extracción v (línea de trazos) y que, además, las fibras de menor diámetro presentan un DIF mayor para todos los parámetros del modelo.

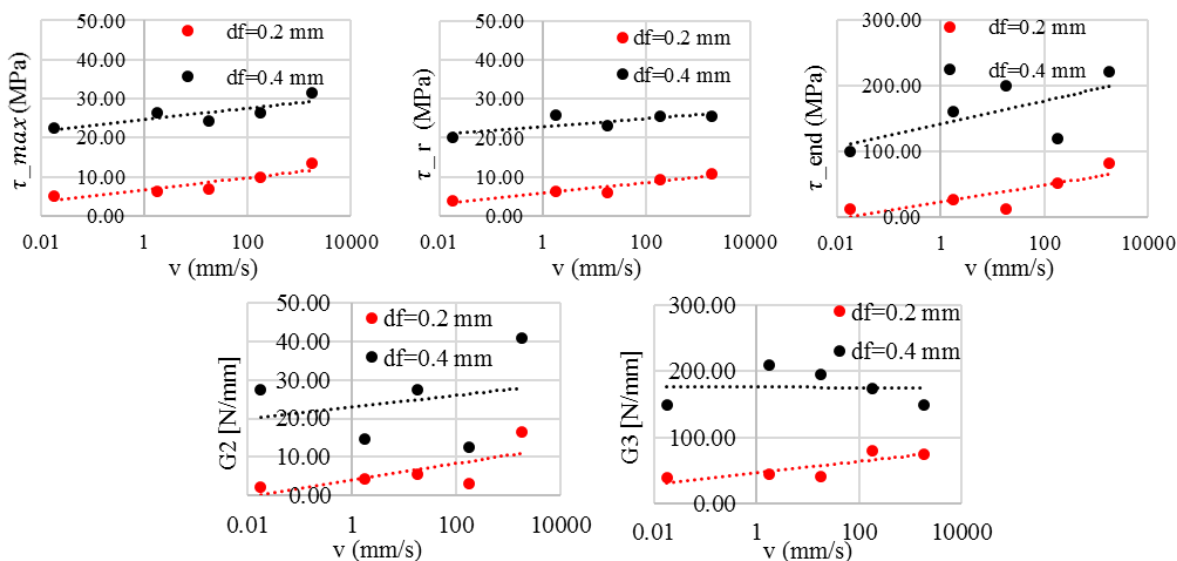


Figura 2: Parámetros del modelo a distintas velocidades de carga (Tai et al. 2016).

3.2 Fibras lisas

En las Figura 3 y Figura 4 se presentan las curvas carga-deslizamiento obtenidas de la simulación numérica de los ensayos de arrancamiento realizados por Xu et al (2016) con fibras lisas (ver Tabla 1) y su comparación con los resultados experimentales, para distintas velocidades de arrancamiento. En todos los casos, se observa que los resultados numéricos reproducen adecuadamente las respuestas obtenidas en los ensayos experimentales tanto en la carga pico como en el comportamiento post-pico. Las curvas carga-deslizamiento presentan una forma atípica debido a la alta resistencia de la matriz. Muestran un endurecimiento luego de la carga pico, en lugar de una caída brusca de la carga seguida de un comportamiento de ablandamiento. Este comportamiento se puede atribuir a la fuerte unión entre la matriz y la fibra (Wille and Naaman, 2013, Xu et al. 2016), además de a la pequeña saliente en la punta resultado del corte de la fibra en el caso de la fibra de 0.38 mm (Xu et al. 2016). Las fibras de 0.20 mm de diámetro muestran una leve sensibilidad a la velocidad de carga, presentado la carga pico de arrancamiento un DIF=1.19 correspondiente a la condición de carga sísmica de 25 mm/s.

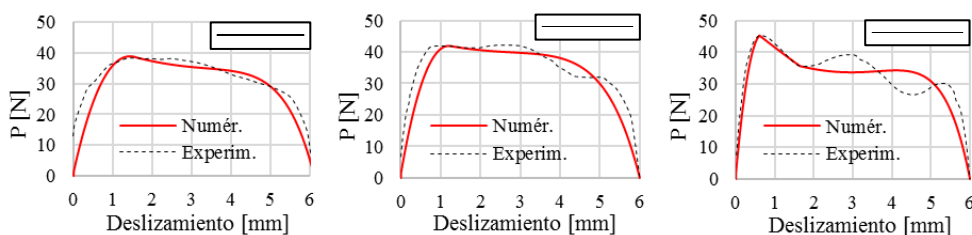


Figura 3: Carga vs Desliz. de fibra lisa $d_f=0.20\text{mm}$ (Xu et al. 2016). a) 0.025 mm/s, b) 2.5 mm/s, c) 25 mm/s.

Las fibras lisas de 0.38 mm de diámetro, presentan un comportamiento similar a las de 0.20 mm de diámetro (Figura 4), pero con mayor carga de arrancamiento debido a que el diámetro de la fibra es mayor. En este caso, los DIF resultaron próximos a 1, lo cual significa que este tipo de fibra no presentó sensibilidad a la velocidad de carga. La comparación de la Figura 3 con la Figura 4 muestra que, al aumentar el diámetro de la fibra, disminuye la sensibilidad a la velocidad de carga de las fibras lisas embebidas en matrices de ultra alta resistencia.

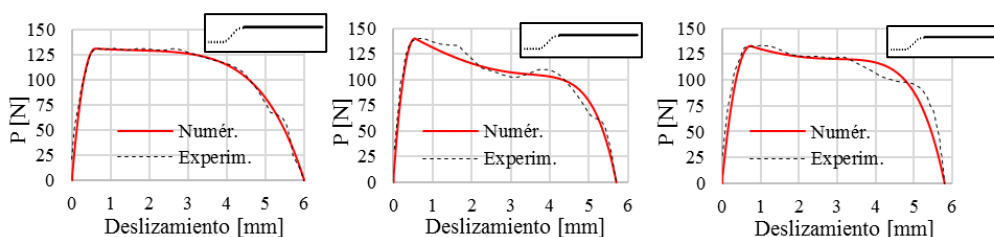


Figura 4: Carga vs Desliz. de fibra lisa $d_f=0.38\text{mm}$ (Xu et al. 2016). a) 0.025 mm/s, b) 2.5 mm/s, c) 25 mm/s.

En Figura 5 se presenta la comparación de resultados numéricos con los obtenidos en ensayos de pull-out de fibras lisas por Tai et al. (2017) (Ver Tabla 1). Al contrario de lo observado por Xu et al. (2016), en estos ensayos la carga pico de arrancamiento si muestra dependencia a la velocidad de carga, obteniéndose un DIF=1.93 para velocidades de carga de impacto (1800 mm/s). Esto puede atribuirse a que se alcanzaron velocidades más elevadas y a una composición distinta de la matriz.

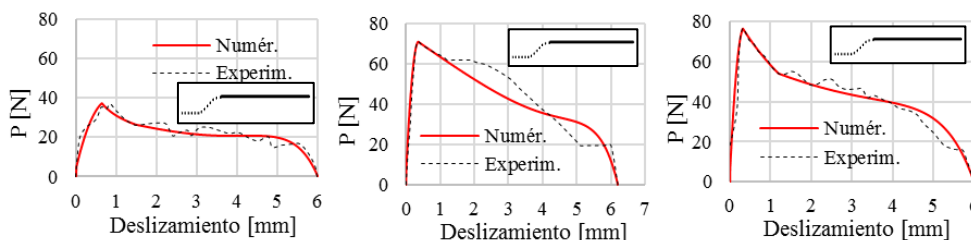


Figura 5: Carga vs Desliz. de fibra lisa $d_f=0.38\text{mm}$ (Tai et al. 2017). a) 0.018 mm/s, b) 18 mm/s, c) 1800 mm/s.

3.3. Fibras de eje curvo

Para la simulación de las fibras de eje curvo se utilizaron los parámetros del modelo de interfaz calibrados para fibras lisas del mismo diámetro, longitud embebida y velocidad de arrancamiento. La fuerza residual se obtuvo a partir de los resultados experimentales observándose que aumenta con la velocidad de extracción.

En la Figura 6 se presenta la comparación de los resultados numéricos con resultados experimentales de arrancamiento de fibras con medio gancho ($d_f=0.38\text{ mm}$, $L_e=6\text{ mm}$) (Xu et al. 2016). Se observa un ajuste aceptable teniendo en cuenta la variabilidad de este tipo de resultados experimentales. Se evidencia un incremento de la carga pico de arrancamiento con la velocidad de carga, obteniendo un DIF=1.28 para una velocidad de carga sísmica de 25 mm/s.

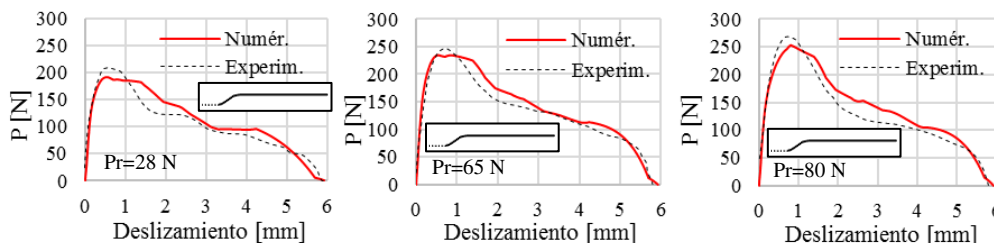


Figura 6: Carga vs Desliz. de fibra con gancho $d_f=0.38\text{mm}$. (Xu et al. 2016). a) 0.025 mm/s, b) 2.5 mm/s, c) 25 mm/s.

En la Figura 7 se presenta la comparación de los resultados numéricos con resultados experimentales de arrancamiento de fibras con ganchos obtenidos por Tai et al. (2017). Se

observa un buen ajuste tanto en la carga pico como en la rama post-pico; sin embargo, no se pudo reproducir correctamente la rama pre-pico observada en los ensayos experimentales. Se asume que esta diferencia se debe a las condiciones del ensayo. Se observa un incremento de la carga pico de arrancamiento con la velocidad de carga, obteniendo un $DIF=1.28$ para una velocidad de carga de 18 mm/s y un $DIF=1.38$ para una velocidad de carga de impacto de 1800 mm/s. Estos DIFs son menores a los observados por el mismo autor para fibras lisas y el modelo logra reproducirlos adecuadamente.

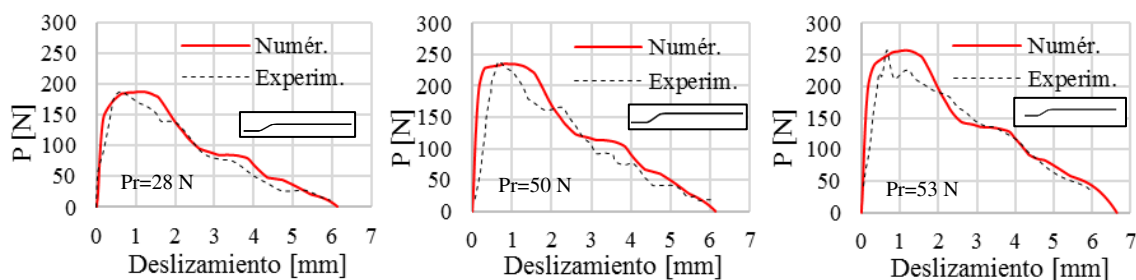


Figura 7: Carga vs Desliz. de fibra con gancho $d_f=0.38\text{mm}$ (Tai et al. 2017). a) 0.018 mm/s, b) 18 mm/s, c) 1800 mm/s

4 CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un modelo para reproducir el arrancamiento dinámico de fibras embebidas en matrices de hormigón y una ley de variación de las tensiones tangenciales entre la fibra y la matriz en el cual los parámetros son dependientes de la velocidad de arrancamiento.

Se analizó la influencia en la respuesta de los efectos inerciales, y se concluyó que estos son despreciables y que la dependencia de la velocidad de arrancamiento está relacionada con la interfaz fibra-matriz. Los parámetros del modelo de interfaz friccional se calibraron en base a resultados experimentales de fibras lisas a distintas velocidades disponibles en la bibliografía. Luego se utilizaron estos parámetros para simular ensayos de arrancamiento de fibras lisas y con gancho, obteniéndose un buen ajuste en todos los casos.

Se observó que, en el caso de las fibras con gancho, la carga residual aumenta a medida que aumenta la velocidad de carga, dependencia que no se evidenció en el coeficiente de fricción. Los resultados mostraron que la amplificación dinámica de la resistencia al arrancamiento resultó mayor en las fibras lisas que en las fibras de eje curvo.

Los resultados experimentales disponibles en la actualidad son aún escasos. Para encontrar leyes de variación de los parámetros del modelo de interfaz con las propiedades de la fibra y la matriz y la velocidad de carga se necesitan mayor número de resultados experimentales de arrancamiento de fibras lisas a distintas velocidades de carga. Para verificar el modelo es necesario además contar con resultados de las mismas fibras con gancho.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET (PIP 2015-0132), a la ANPCyT (PICT 2017 1313) y a la UNT (PIUNT 26E623) por el apoyo económico.

REFERENCIAS

- Abu-Lebdeh, T., Hamoush, S. and Zornig, B., Rate effect on pullout behavior of steel fibers embedded in very-high strength concrete. *Am. J. Eng. Appl. Sci.* 3(2):454–463, 2010.
- Azzam, A., Dynamic analysis of fiber pullout mechanism in cementitious composites under harmonic pullout displacement: analytical approach, *Int. J. Mech. Sci.*, 119:36-50. 2016.

- Cao, Y. Y. Y., Yu, Q. L., Brouwers, H. J. H. and Chen, W., Predicting the rate effects on hooked-end fiber pullout performance from Ultra-High Performance Concrete (UHPC). *Cem. Concr. Res.*, 120: 164-175, 2019.
- Chanvillard, G., Modeling the pullout of wire-draw steel fibers. *Cem. Concr. Res.*, 29:1027-1037, 1999.
- Cox, B. N., Sridhar, N. and Beyerlein, I. J., Inertial effects in the pullout mechanism during dynamic loading of a bridged crack. *Acta Mater*, 49(18):3863-77, 2001.
- Cunha, V.M., Barros, J. and Sena-Cruz, J., Pullout Behaviour of Hooked-end Steel Fibres in Self-compacting Concrete, PhD Thesis, Dep. Civil Engineering, University of Minho, 2010.
- Gokoz, U.N. and Naaman, A.E., Effect of strain-rate on the pull-out behaviour of fibres in Mortar. *Int. J. Cem. Compos. Light. Concr.*, 3:187-202, 1981.
- Isla, F., Modelo para hormigón reforzado con fibras de acero. PhD Tesis UNT, 2014.
- Naaman, A. E., ASCE, M., Namur, G. G., Alwan, J. M. and Najm, H. S., Fiber pullout and bond slip. I: Analytical Study. *Journal of Structural Engineering ASCE* 117:9, 1991.
- Nieuwoudt, P. D., and Boshoff, W. P., Time-dependent pull-out behaviour of hooked-end steel fibres in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 79:133-147, 2017.
- Park, J.K., Park, S.H. and Kim, D.J., Effect of matrix shrinkage on rate sensitivity of the pullout response of smooth steel fibers in ultra-high-performance concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 94:226-237, 2018.
- Park, J. K., Ngo, T. T. and Kim, D. J., Interfacial bond characteristics of steel fibers embedded in cementitious composites at high rates. *Cem. Concr. Res.* 123: 105802, 2019.
- Pinchin, D. and Tabor, D., Interfacial contact pressure and frictional stress transfer in steel fiber cement, *Proc. RILEM Conference, Testing and Test Methods of Fibre Cem. Compos.* (Ed. R. N. Swamy) *The Construction Press, UK*, 337-344, 1978.
- Sridhar, N., Yang, Q. D. and Cox, B. N., Slip, stick, and reverse slip characteristics during dynamic fibre pullout. *J Mech Phys Solids.*, 51(7):1215-41, 2003.
- Tai, Y-S., El-Tawil, S. and Chung, T-H., Performance of deformed steel fibers embedded in ultra-high performance concrete subjected to various pullout rates. *Cem. Concr. Res.*, 89:1-13, 2016.
- Tai, Y-S and El-Tawil, S., High loading-rate pullout behavior of inclined deformed steel fibers embedded in ultra-high performance concrete. *Construct. Building Mat.*, 148:204-218, 2017.
- Wille, K. and Naaman, A.E., Effect of ultra-high-performance concrete on pullout behavior of high-strength brass-coated straight fibers, *ACI Mater. J.* 4:451-462, 2013.
- Xu, M., Hallinan, B., Wille, K. Effect of loading rates on pullout behavior of high strength steel fibers embedded in ultra-high performance concrete. *Cem. Concr. Compos.*, 70:98-109, 2016.
- Yoo, D-Y., Kim, J-J. and Park, J-J., Effect of fiber spacing on dynamic pullout behavior of multiple straight steel fibers in ultra-high-performance concrete. *Construct. Building Mat.*, 210:461-472, 2019a.
- Yoo, D-Y., Kim, J-J. and Chun, B., Dynamic pullout behavior of half-hooked and twisted steel fibers in ultra high-performance concrete containing expansive agents. *Compos. Part B.* 167:517-532, 2019b.