

## **BARRERAS DE PROTECCIÓN CONTRA IMPACTO DE VEHÍCULOS CONSTRUIDAS CON HORMIGÓN DE ALTAS PRESTACIONES REFORZADO CON FIBRAS**

### **PROTECTION BARRIERS AGAINST IMPACT OF VEHICLES BUILT WITH HIGH PERFORMANCE FIBER REINFORCED CONCRETE**

**Francisco Cerviño<sup>a</sup> y Bibiana Luccioni<sup>a,b</sup>**

<sup>a</sup>*Instituto de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, 4000 San Miguel de Tucumán, Argentina, bluccioni@herrera.unt.edu.ar, <https://www.facet.unt.edu.ar/iest/>*

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

**Palabras clave:** Barreras de protección, impacto, hormigón de altas prestaciones reforzado con fibras.

**Resumen.** En este trabajo se estudia numéricamente el comportamiento mecánico de barreras de protección contra impacto de vehículos construidas con Hormigón de Alta Prestaciones Reforzados con Fibras (HAPRF) a los efectos de comparar su desempeño frente a barreras de hormigón convencional y contribuir al diseño de las mismas. El HAPRF aparece como alternativa para este tipo de construcciones debido a que combina alta resistencia frente a cargas estáticas y dinámicas con una baja porosidad, lo que le confiere grandes mejoras en la durabilidad. El agregado de fibras dúctiles y de alta resistencia permite reducir la naturaleza frágil del hormigón y produce un aumento notable en la capacidad de absorción de energía. Primeramente, se dimensiona la armadura de la barrera para distintas alternativas de material. Luego se calibra un modelo material mediante ensayos de laboratorio para representar adecuadamente el comportamiento del HAPRF bajo cargas estáticas y dinámicas. Finalmente, se simula numéricamente el impacto de un vehículo contra las barreras diseñadas. Los resultados numéricos permiten obtener conclusiones respecto al mejor desempeño de la barrera de HAPRF respecto a la convencional.

**Keywords:** Protection barriers, impact, high performance fiber reinforced concrete.

**Abstract.** The mechanical behavior of protective barriers vehicles built with High Performance Fiber Reinforced Concrete (HPFRC) against impact is numerically studied in this paper. The final objective of the research is the comparison of their performance with that of conventional concrete barriers and to bring recommendations for their design. HPFRC appears as an alternative for this type of construction because it combines high resistance to static and dynamic loads with low porosity, which gives great improvements in durability. The addition of ductile and high strength fibers allows reducing the brittle nature of concrete and leads to a remarkable increase in energy absorption capacity. First, the reinforcement of the barrier is dimensioned for different material alternatives. Then, a material model is calibrated by laboratory tests to adequately represent the behavior of HPFRC under static and dynamic loads. Finally, the impact of a vehicle on the barriers is numerically simulated. The numerical results allow to obtain conclusions regarding the better performance of the HPFRC barriers with respect to the conventional one.

## 1 INTRODUCCIÓN

Actualmente se busca construir estructuras resistentes a acciones extremas para reducir el daño, y de esta forma incrementar la función protectora. Ello ha llevado al desarrollo de nuevos materiales y a estudiar en detalle su comportamiento para lograr un diseño óptimo de los mismos. El Hormigón de Alta Prestaciones Reforzados con Fibras (HAPRF) aparece como una alternativa frente a cargas extremas. Es un hormigón de altas prestaciones (HAP) al que se le incorporan fibras dispersas en la masa de la matriz. La adición de fibras de acero da como resultado un comportamiento mejorado, más dúctil y, dependiendo del contenido de fibras, se pueden alcanzar aumentos de resistencia, ductilidad (Holschemacher et al. 2010), resistencia a flexión y corte. El refuerzo con fibras también mejora el comportamiento a fatiga y la resistencia a impacto del hormigón, aumenta la capacidad de absorción de energía y reduce la fisuración por contracción de fragüe y la permeabilidad. El HAPRF combina alta resistencia frente a cargas estáticas y dinámicas con una baja porosidad, lo que le confiere grandes mejoras en la durabilidad. Por lo tanto, es especialmente adecuado para resistir cargas severas y acciones ambientales.

Sin embargo, la utilización de este material en nuestro país es prácticamente nula debido a que es un material nuevo y no se cuenta con métodos de cálculo y criterios de diseño para su utilización en elementos de protección. Por otro lado, la combinación de alta prestación con alta eficiencia económica es difícil de lograr. El uso de combinaciones de hormigones normales y HAPRF en secciones compuestas permite disminuir costos. Puede ser aplicado tanto en la construcción de estructuras nuevas como en la reparación o refuerzo de estructuras existentes.

En este trabajo, se estudia numéricamente el comportamiento mecánico de barreras de protección contra impacto de vehículos construidas con HAPRF a los efectos de contribuir al diseño de las mismas. Se compara el comportamiento de distintas alternativas con el fin de poder valorar las ventajas prestacionales de cada una.

Las barreras de seguridad vial tienen por función primordial reencauzar a los vehículos que salen de la calzada permitiendo al conductor retomar el control del vehículo y regresar al cauce normal de circulación del tránsito y, si esto no es posible, minimizar el nivel de daño causado por el accidente, protegiendo a los conductores y ocupantes de los vehículos usuarios de una vía, y a los transeúntes que circulan en zonas próximas a la calzada, de accidentes causados por la pérdida de control vehicular, mitigando el riesgo de colisión con obstáculos ubicados fuera de la calzada, descarrilamiento y volcadura y colisión con vehículos que circulan en la calzada opuesta (Chang Albitres, 2010). Las barreras laterales se diseñan para impacto en una cara mientras que las barreras de mediana son diseñadas para impacto en ambas caras (DNV, 2010).

En los EUA y Europa, la validez al choque de cualquier dispositivo de protección se determina mediante ensayos estrictamente normalizados. Las normas especifican las pruebas que se deben desarrollar para evaluar el nivel de riesgo a que están expuestos los ocupantes de un vehículo, la integridad estructural de la barrera, y el comportamiento post-impacto del vehículo. Los niveles de prueba se diferencian en la velocidad de impacto, ángulo de impacto, masa total del vehículo, y tipo de vehículo. La selección del nivel de prueba para un proyecto está asociada básicamente con la velocidad de diseño, composición del tránsito y las condiciones del entorno.

En este trabajo se estudian las barreras rígidas de perfil tipo New Jersey (DNV, 2010). El mecanismo de funcionamiento de la barrera consiste en la absorción de energía de choque mediante el sistema de suspensión del vehículo, y la elevación de éste. Se estudia numéricamente el comportamiento de la barrera, construida con un hormigón convencional, con HAPRF y una combinación de ambos materiales.

## 2 DIMENSIONADO DE LA BARRERA DE PROTECCIÓN

### 2.1 Procedimiento de dimensionado

El cálculo de las barreras protección se realiza en base a las especificaciones de diseño de puentes de la [AASHTO \(2017\)](#) que establecen ciertas restricciones de cargas y geometría para el cálculo y diseño de sistemas de contención y además exigen que las barreras tengan un desempeño satisfactorio en ensayos de impacto a escala real.

Las fuerzas de diseño son fuerzas estáticas que representan la fuerza dinámica transferida al sistema de contención por un determinado vehículo impactando a una velocidad y ángulos específicos de acuerdo a la categoría del ensayo. La fuerza del impacto se descompone en tres componentes respecto al eje de la barrera: una transversal o lateral hacia afuera ( $F_t$ ), una longitudinal ( $F_l$ ) y una vertical ( $F_v$ ) dirigida hacia abajo ([Cernuschi, 2005](#)). Estas fuerzas de diseño se encuentran repartidas en una longitud de contacto, ver [Figura 1](#). Se deben considerar dos combinaciones de carga: las cargas transversal  $F_t$  y longitudinal  $F_l$  actuando simultáneamente y la carga vertical  $F_v$  solamente. Siendo un estado límite ante un evento extremo, el dimensionamiento se realiza para el estado límite de rotura con las cargas establecidas según el nivel de prueba y sin reducción de resistencia ( $\phi = 1$ ).

El método utilizado para el dimensionado de barreras de hormigón armado es el de líneas de rotura que supone la plastificación de las secciones. Las líneas de rotura para la contención de hormigón se muestran en la [Figura 1](#). En las regiones lejanas a las juntas predomina el mecanismo de rotura de tres líneas de la [Figura 1a](#) donde existen dos líneas de rotura que traccionan la cara interior y una que tracciona la cara exterior de la barrera. En las cercanías de las juntas y el final de la barrera aparece una línea de rotura como muestra la [Figura 1b](#) que tracciona la cara interior de la barrera ([Cernuschi, 2005](#)).

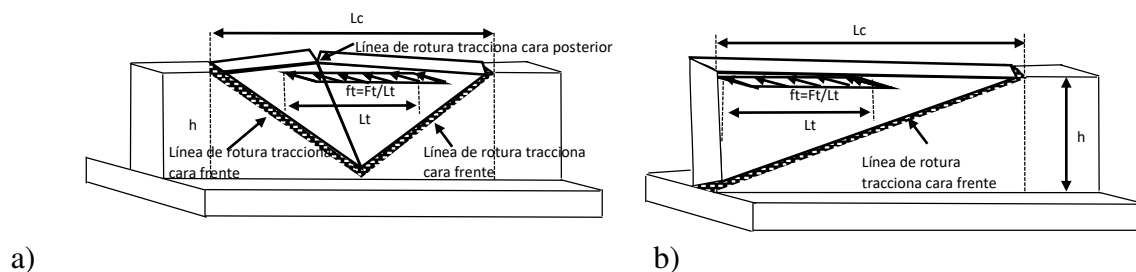


Figura 1: Líneas de rotura ([Cernuschi, 2005](#)). a) Tramo, b) Extremos

Para el dimensionado de barreras de hormigón armado se siguió el procedimiento de cálculo a flexión establecido en CIRSOC 201 ([INTI, 2005](#)). Para el dimensionado de la barrera de HAPRF se utilizó un procedimiento similar pero el cálculo del momento nominal de la sección se realizó con la metodología de CEB-FIP ([fib, 2012](#)).

En la [Figura 2a](#) se describe el estado de deformación y tensión correspondiente a la rotura de una sección de hormigón armado con fibras.  $\epsilon_{cu}$  es la deformación de rotura del hormigón en la zona comprimida,  $\epsilon_s$  es la deformación de la armadura que, si la armadura se encuentra lo suficientemente alejada del eje neutro, será mucho mayor que la deformación de fluencia  $\epsilon_y$ ,  $\epsilon_F$  es la deformación de la sección traccionada más alejada de hormigón,  $f_{cd}$  es la tensión de rotura del hormigón,  $f_y$  es la tensión de fluencia del acero y  $f_{Ftd}$  es la tensión en la zona traccionada del hormigón que se puede suponer como aproximación que tiene una distribución bi-lineal. Para la zona comprimida del hormigón, el diagrama desarrollado en una longitud  $x$  puede simplificarse en uno equivalente de forma rectangular de altura  $\lambda x$  y tensión  $\eta f_{cd}$ . Los factores  $\lambda$  y  $\eta$  se calculan en función de la resistencia a compresión como sigue:

$$\lambda = 0.8 \quad y \quad \eta = 1 \quad \text{para } f_{cd} \leq 50\text{MPa}$$

$$\lambda = 0.8 - (f_{cd} - 50)/400 \quad y \quad \eta = 1 - (f_{cd} - 50)/200 \quad \text{para } 50\text{MPa} \leq f_{cd} \leq 100\text{MPa} \quad (1)$$

Para la sección de hormigón traccionado, el diagrama de tensiones desarrollado en una longitud y se puede simplificar en un rectángulo equivalente de tensión  $f_{Ftud}$  y altura  $y$ , como se muestra en la [Figura 2a](#). La tensión  $f_{Ftud}$  es el valor característico de la resistencia a tracción residual máxima del hormigón con fibras que suponiendo  $\epsilon_{Fu} \leq 1\%$  se determina como  $f_{Ftud} = f_{R3}/3$ , donde  $f_{R3}$  es la resistencia residual característica del hormigón reforzado con fibras para una apertura de fisura  $\text{CMOD} = 2.5 \text{ mm}$  en el ensayo de flexión, ver [Figura 2b](#).

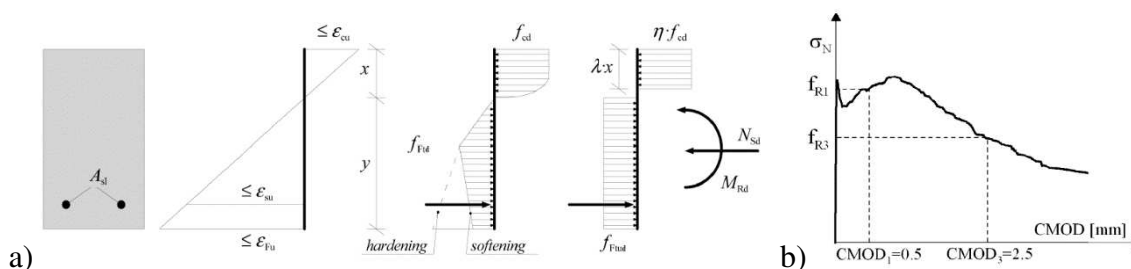


Figura 2: Resistencia a flexión para hormigón reforzado con fibras ([fib, 2012](#)). a) Deformaciones y tensiones, b) Diagrama tensión- apertura de fisura (CMOD) del ensayo de flexión

La altura  $x$  del bloque comprimido se determina a partir del equilibrio de fuerzas horizontales como,

$$x = (A_s f_y + f_{Ftud} b h) / (\eta f_{cd} b \lambda + f_{Ftud} b) \quad (2)$$

donde  $h$  es la altura de la sección. El momento resultante se calcula como

$$M_n = F_t z_1 + F_s z_2 \quad z_1 = h - (h - x)/2 - \lambda x/2 \quad z_2 = d - \lambda x/2 \quad (3)$$

Donde  $F_t$  es la fuerza de tracción resultante del hormigón,  $F_s$  es la fuerza de tracción resultante del acero y  $d$  es la altura útil de la sección para la armadura traccionada. El momento de diseño se toma igual al momento resultante.

## 2.2 Dimensionado

Se dimensionó una barrera de protección rígida de perfil “New Jersey” (NJ) para un nivel de prueba cuatro, TL-4 ([AASHTO, 2017](#)) consistente en el impacto con un ángulo de  $25^\circ$  de un vehículo 1100 kg de masa a una velocidad de 100 km/h. La altura mínima de la barrera para este nivel de prueba es de 0.8 m, las fuerzas transversal, longitudinal y vertical valen respectivamente 0.8, 0.8 y 1.1 kN y las longitudes transversal, longitudinal y vertical son respectivamente 1.1, 1.1 y 5.5 m.

Se consideraron las siguientes alternativas para el material: 1) Barrera de hormigón H25; 2) Barrera de HAPRF; 3) Barrera con núcleo de H25 y recubrimiento de HAPRF. El HAPRF utilizado para las opciones 2 y 3 es un material del cual se dispone de resultados experimentales ([Luccioni et al. 2017](#)). Contiene  $80 \text{ kg/m}^3$  (1% del volumen) de fibras de acero de alto contenido de carbono con una resistencia nominal a tracción de 2300 MPa. Las fibras tienen ganchos en los extremos, una longitud de 60 mm y 0,70 mm de diámetro. Los valores medios de resistencia a compresión y módulo de elasticidad son 109 MPa y 41 GPa respectivamente y  $f_{R3} = 17.6 \text{ MPa}$ . Para la armadura se consideró un acero ADN 420.

En la [Tabla 1](#) se consignan las armaduras obtenidas para una barrera de 0.810 m de altura y las distintas alternativas de material propuestas. A partir de los cálculos realizados, se observa que la resistencia residual a tracción del HAPRF permite reducir considerablemente la sección

de acero frente a la del hormigón convencional. Teniendo en cuenta que el recubrimiento no tiene una contribución significativa al comportamiento estructural de la barrera, para la alternativa 3) se considera la armadura calculada en la alternativa 1).

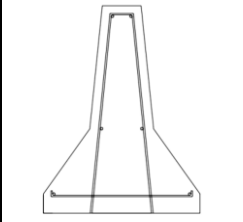
	Armadura	H-25 (1)	HAPRF (2)
	Horizontal	$\phi 10$	$\phi 6$
	Vert. Centro	$\phi 6$ c/50mm	$\phi 6$ c/50mm
	Vert. Extremos	$\phi 20$ c/20 mm	$\phi 6$ c/20 mm

Tabla 1: Armadura de las barreras.

### 3 HERRAMIENTA NUMÉRICA Y MODELOS MATERIALES

Son bastante escasos los modelos adecuados para simular el comportamiento de HAPRF bajo cargas explosivas o impacto (Hung and Li, 2014). En general, la respuesta bajo cargas explosivas e impacto se simula mediante códigos explícitos del tipo hidrocódigo utilizando modelos originalmente desarrollados para hormigón. En este trabajo se utilizó el programa ANSYS Autodyn (2017) para modelar numéricamente el impacto del vehículo sobre la barrera. Se trata de un hidrocódigo que resuelve de manera explícita los problemas dinámicos no lineales.

Para simular el comportamiento mecánico del hormigón normal y del HAPRF se utilizó el modelo RHT (Riedel et al. 2009) en combinación con la ecuación de estado p- $\alpha$  (Herrmann, 1969). Se ha probado que esta ecuación de estado es capaz de simular correctamente el comportamiento termodinámico del hormigón a altas presiones y también permite una descripción detallada y razonable en el rango de bajas presiones (Tu and Lu, 2009).

El modelo RHT ha sido desarrollado para hormigones sin fibras pero es adecuado para simular distintos tipos de hormigón si se calibran adecuadamente los parámetros de entrada. Considera al hormigón como un material elastoplástico que se comporta de manera elástica hasta alcanzar la superficie de fluencia, luego endurece hasta alcanzar el criterio de falla y finalmente ablanda hasta la resistencia residual. El modelo RHT considera el endurecimiento por deformación, dependencia del tercer invariante del tensor de tensiones y de la velocidad de deformación e incluye daño durante el ablandamiento.

Las cargas de impacto producen ondas de gran intensidad que pueden producir la fractura o la desintegración del material, generando discontinuidades en el material. Con el objeto de describir este tipo de efectos, se utilizó una técnica de erosión, la cual permite remover del cálculo aquellas celdas que han alcanzado un cierto valor predefinido de deformación geométrica instantánea (Luccioni et al. 2013).

Para simular el comportamiento mecánico de las barras de acero que conforman la armadura de la barrera de protección se utilizó el modelo de resistencia Johnson-Cook en el cual el límite elástico varía según la tensión, la velocidad de deformación y la temperatura.

### 4 CALIBRACIÓN DE PROPIEDADES MATERIALES

Las propiedades mecánicas estáticas del material fueron obtenidas mediante simulaciones de ensayos a compresión y ensayos a flexión de vigas entalladas y su comparación con resultados experimentales (Luccioni et al. 2017). En la Tabla 2 se presentan los parámetros del modelo RHT obtenidos de esta calibración. Para el resto de los parámetros se tomaron los valores definidos para un hormigón de 140 MPa en la librería de materiales del programa AUTODYN.



Módulo de corte(kPa )	1.65E+07	Exp. $\delta$ dep. veloc. def. trac.	1.49E-02
Resist. compres (fc) (kPa )	1.14E+05	Constante de daño, D1	4.00E-02
Resistencia de trac (ft/fc)	8.00E-02	Constante de daño, D2	1.00E+00
Resistencia al corte (fs/fc)	1.44E-01	Deformación mínima de falla	5.00E-01
Resistencia elástica/ft	7.00E-01	Fracción del mód. corte resid.	1.30E-01
Const. resist. post-falla B	0.00E+00	Falla a tracción	Hydro (Pmin)
Exp. $\alpha$ dep. veloc. comp.	1.105E-02	Deformación de erosión	2.00E+00

Tabla 2: Parámetros calibrados del modelo RHT

Para la simulación numérica de los ensayos de compresión uniaxial se utilizó un solo elemento de axial simetría de 20 mm x 5 mm ya que se trata de un estado uniforme de tensiones. Se restringió el desplazamiento vertical en la cara inferior y se aplicó una velocidad de deformación constante en la cara superior de 0,001 mm/ms, representando un ensayo cuasi estático, como se muestra en la [Figura 3a](#) en la que también se presenta la curva tensión deformación obtenida para el HAPRF y para el mismo hormigón pero sin fibras. No se cuenta con la curva tensión-deformación experimental de estos hormigones pero puede observarse que los resultados numéricos reproducen aproximadamente el valor de la resistencia pico medida en los ensayos de probetas cilíndricas. La resistencia a compresión se entra como un dato del modelo y el resto de los parámetros que definen la curva de endurecimiento / ablandamiento se ajustó para obtener curvas similares a las presentadas por [Marar et al. \(2011\)](#) para HAP y HAPRF. Se observa que en este caso al agregar 1% de fibras al HAP no hay prácticamente diferencia en la resistencia a compresión, como se observó en los ensayos, pero sí aumenta la ductilidad en la respuesta post-pico gracias a las fibras que cosen las fisuras que se forman en la dirección de la carga, impidiendo que las mismas se abran libremente.

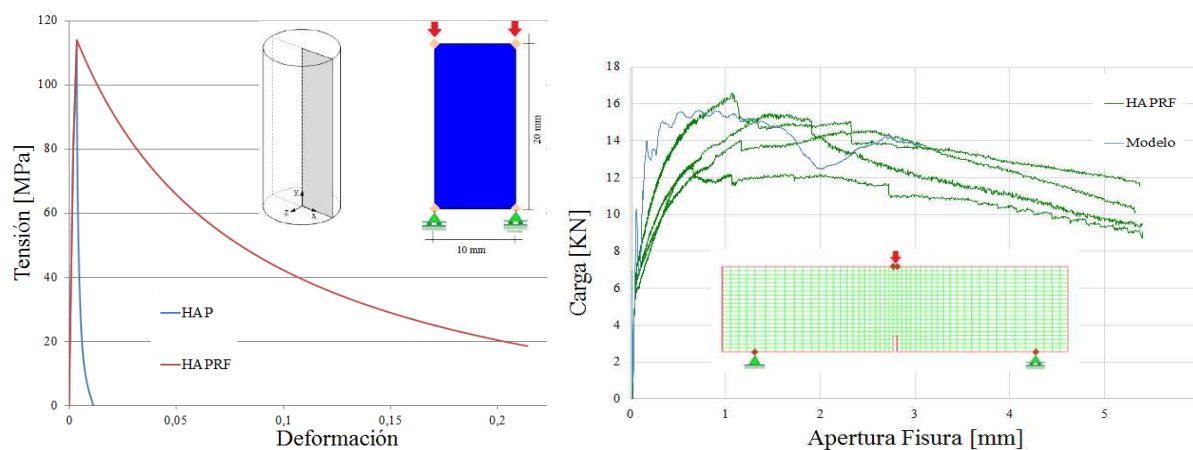


Figura 3: Ensayos estáticos.a) Compresión uniaxial, b) Flexión

Para completar la calibración de los parámetros estáticos de los hormigones se simularon los ensayos de flexión de vigas, de aproximadamente 430 mm x 55 mm x 105 mm con una entalla en la parte central (5 mm x 20 mm) y con luz de apoyo de 350 mm. En la [Figura 3b](#) se muestra la malla de elementos finitos utilizada compuesta por elementos prismáticos de 3 dimensiones. Se utilizó un solo elemento en el espesor debido a que se trata de un problema de estado plano de tensiones. La malla se densificó en la zona central de la viga donde se espera que se produzca la rotura. Para representar los apoyos se restringieron las velocidades en la dirección vertical en ambos lados y en la dirección horizontal del lado izquierdo como se indica en la [Figura 3b](#). Para

simular el ensayo se aplicó en los nodos de la parte central una velocidad de 0,01 mm/ms. En la [Figura 3b](#) se presenta la curva carga – apertura fisura (CMOD) obtenida numéricamente y su comparación con los resultados experimentales de HAPRF ([Luccioni et al. 2017](#)). El modelo representa bien la primera parte del comportamiento y la resistencia a flexión pero luego presenta problemas numéricos debido a que el programa utilizado es un programa dinámico explícito que no está pensado para resolver problemas estáticos. En este caso se lo usa para calibrar el modelo que se utilizará para el problema de impacto ya que el modelo RHT no está disponible en los módulos de análisis estático de ANSYS. Se usan velocidades bajas pero mayores a las correspondientes a un ensayo estático para que el cálculo no sea tan lento y se desactiva la dependencia de la velocidad de deformación. Se puede observar que, a pesar de la dificultad mencionada, el programa reproduce en forma bastante aproximada la curva experimental y la carga máxima.

El modelo RHT tiene en cuenta el efecto de la velocidad de deformación en la resistencia a través de un factor de amplificación dinámica que depende de los exponentes  $\alpha$  y  $\delta$  para compresión y tracción respectivamente ([Riedel et al. 2009](#)). En este caso no se cuenta con resultados experimentales de los hormigones estudiados por lo que se utilizaron resultados obtenidos por otros autores para hormigones similares ([Hao and Hao, 2011](#); [Luccioni et al. 2018](#)) para calibrar los coeficientes  $\alpha$  y  $\delta$  que se presentan en [Tabla 2](#).

## 5 SIMULACIÓN DE LOS ENSAYOS DE IMPACTO CONTRA LA BARRERA

Los modelos utilizados representan un choque lateral oblicuo de un vehículo contra una barrera de protección, construida con distintos materiales correspondientes a las 3 alternativas planteadas. Para la barrera se usó el modelo de la [Figura 4](#) que representa un segmento de 3.0m de longitud e incluye el cuerpo de la barrera ([Figura 4a](#)) para el cual se emplearon elementos prismáticos y la armadura simulada mediante elementos de barra ([Figura 4b](#)). La armadura se une a los nodos del cuerpo de la barrera. El tamaño promedio de los elementos de la barrera es de 40 mm. La barrera se consideró fija en su parte inferior (restricción de la velocidad en tres direcciones ortogonales) y libre en sus extremos. Las propiedades utilizadas para HAPRF son las descriptas y calibradas en la sección 4. Para el caso del H25 se utilizaron las propiedades correspondientes a un hormigón de resistencia media de 30 MPa.

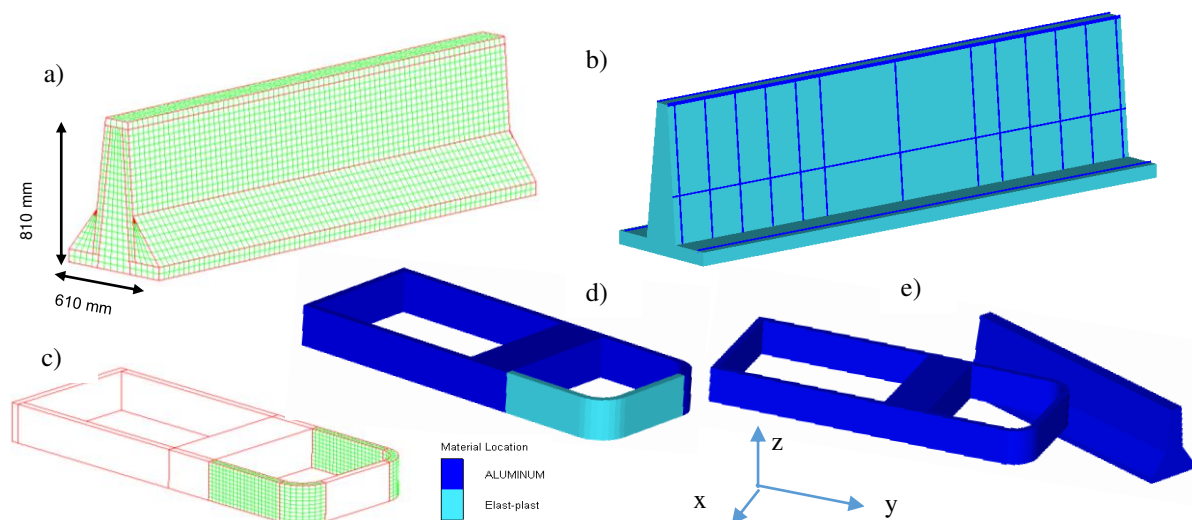


Figura 4: Modelo del ensayo de impacto. a) Cuerpo de la barrera, b) Armadura de la barrera, c) Vehículo, d) Materiales del vehículo, e) Modelo completo

El vehículo se modeló de forma aproximada para representar el impacto de una masa equivalente, a la velocidad, altura y ángulo correspondientes. La malla se densificó en la parte que impacta contra la barrera, ver [Figura 4c](#). La mayor parte del vehículo modelado estaba constituido por aluminio macizo para representar la rigidez del chasis y el peso. El frente y el lateral que impactan a la barrera estaban conformados por un material elasto-plástico (ver [Figura 4d](#)) de manera que se deforme al impactar y absorba energía. Este material tiene un módulo de elasticidad de 210000 MPa, un coeficiente de Poisson de 0.3, una densidad de 7.89 g/cm<sup>3</sup> y un límite elástico de 300 MPa. Estas simplificaciones pueden alterar, de alguna forma, los resultados respecto a lo que sería el impacto de un vehículo real pero las mismas permiten tener una primera idea comparativa de las distintas alternativas de diseño ya que la modelación más realista del vehículo excede al alcance de este trabajo.

Se dio una velocidad inicial de 100 km/h al vehículo en una dirección que forma un ángulo de 25° con el eje de la barrera (ver [Figura 4e](#)). Se lo colocó inicialmente muy cerca de la barrera y se estableció la interacción entre ambos de manera que en un tiempo muy corto se produzca el impacto. Este impacto también es una aproximación del caso real ya que el vehículo idealizado no rodaba sobre la calzada y no iba seguir una trayectoria como la esperada al impactar contra la barrera. La simulación sólo representa en forma aproximada el primer impacto del paragolpe sobre la barrera.

Las [Figuras 5](#) muestran la deformación plástica efectiva de la barrera correspondiente a las tres alternativas estudiadas para su comparación. Queda en evidencia la diferencia de ductilidad de los hormigones. Se observa que la barrera construida con H25 alcanza una menor deformación plástica en comparación de las otras dos alternativas y se produce la erosión o daño local del material del material en la zona de impacto. Prácticamente no hay diferencias en el daño local entre las alternativas 2) y 3) ya que en ambos casos el vehículo impacta sobre HAPRF y este material se daña mucho menos que el H25. El daño local por el impacto puede reducirse usando al menos un recubrimiento de HAPRF y, de esa manera, se prolonga la vida en servicio de la barrera.

Las [Figuras 6](#) presentan los desplazamientos en la dirección x e y (dirección del vehículo y su perpendicular, ver [Figura 4e](#)), respectivamente, de un punto situado en el eje de simetría de la barrera a una altura de 315 mm sobre la base y 300 mm por delante de la zona de impacto. Se observa que los desplazamientos son menores en la barrera de H25 que para las otras dos barreras. Esto se debe a que, como el hormigón convencional es frágil, la mayor parte de la energía del impacto se consume en el daño local (erosión) antes de la onda de tensión se propague y la barrera trabaje estructuralmente. Por el contrario, las barreras construidas con HAPRF, presentan un comportamiento más dúctil y se transmiten las tensiones generadas por el impacto hacia el centro. La barrera de H25 recubierta por HAPRF tiene un mayor desplazamiento que la de HAPRF en ambas direcciones, debido a que el núcleo es menos rígido que el de la barrera de HAPRF. Comparando los desplazamientos de las barreras se puede ver que el impacto contra la barrera de hormigón convencional producirá además un mayor daño al vehículo. En cambio, la barrera de HAPRF es más eficiente incluso como amortiguador del golpe.



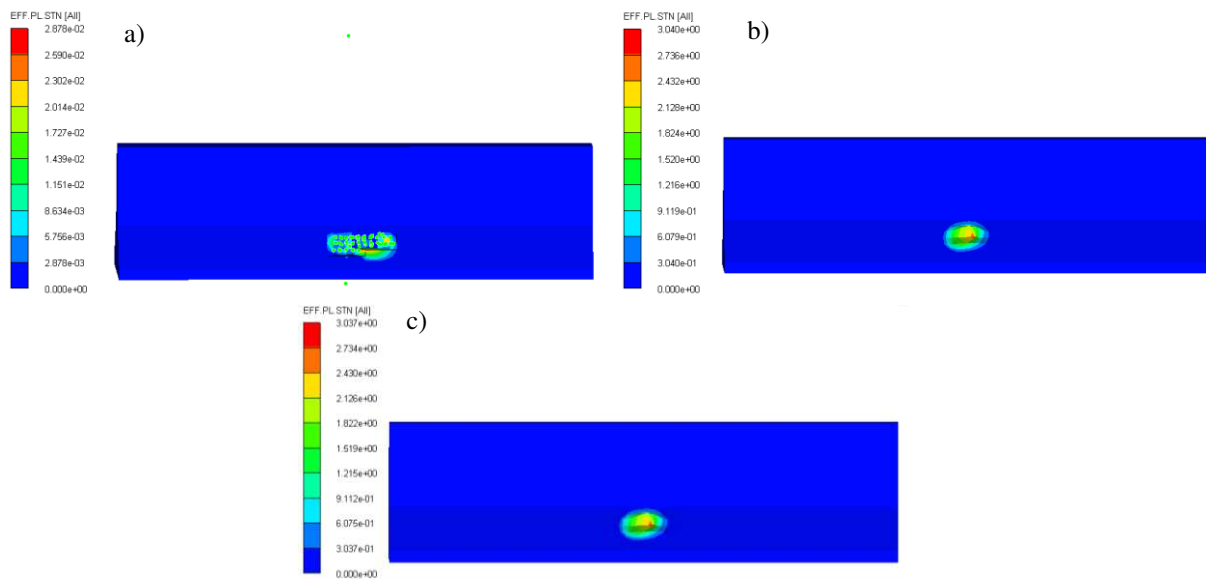


Figura 5: Deformaciones plásticas. a) H25, b) HAPRF, c) H25 con recubrimiento de HAPRF

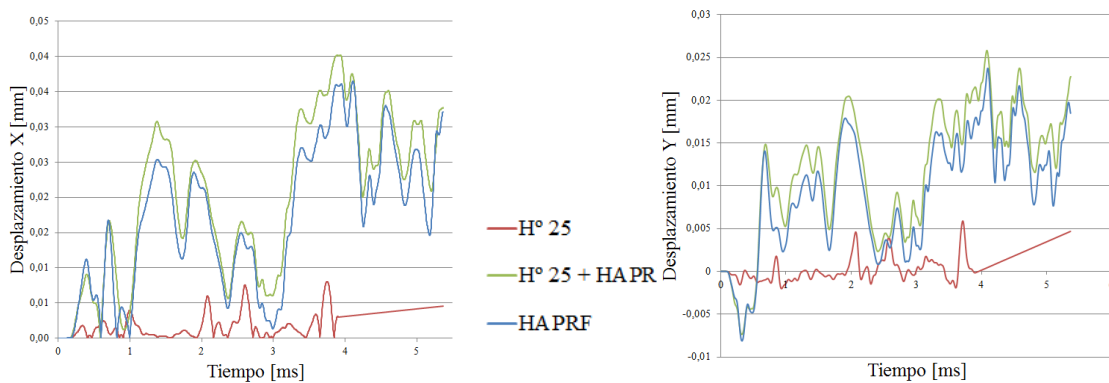


Figura 6: Desplazamiento vs Tiempo, para las distintas alternativas

## 6 CONCLUSIONES

El aporte del HAPFR a la resistencia a tracción permite reducir la armadura de la barrera. Por otro lado, las barreras que contienen HAPRF presentan mejor respuesta al impacto del vehículo que las de hormigón convencional que se erosiona en la zona de impacto. En contraste, el HAPRF muestra mayor ductilidad en la respuesta sin llegar a erosionarse.

Si bien los análisis y resultados obtenidos son netamente mecánicos, a partir de ellos se pueden extraer algunas conclusiones sobre la durabilidad de la barrera. Aun cuando las barreras no hayan sufrido impacto de vehículos, la baja porosidad y permeabilidad lleva a una mayor durabilidad del HAPRF frente al hormigón convencional. En caso de sufrir impacto, la barrera de hormigón normal, si está adecuadamente diseñada y calculada, puede seguir en servicio. Pero, al encontrarse erosionada, será aún más propensa al ingreso de agentes agresivos provenientes del medio ambiente, lo que facilitará el deterioro de los materiales constructivos y la corrosión de la armadura e influirá negativamente en su parte estética, requiriendo un mayor mantenimiento que las barreras construidas con HAPRF.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al CONICET, a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, al CIUNT y a la UNT por el apoyo económico brindado.

## REFERENCIAS

- ANSYS, AUTODYN Version 18.1 User's Manual, 2017.
- Cernuschi, D., Las barandas en los puentes carreteros: estática y estética. *XX Concurso sobre Temas Viales*. Departamento Obras De Arte – Subgerencia Estudios Y Proyectos – Gerencia Técnica DVBA, La Plata, 2005.
- Chang Albitres, C. Guía para la ubicación selección y diseño de barreras de seguridad vial. Asocem, 2010.
- DNV, Normas y recomendaciones de diseño geométrico y seguridad vial. Capítulo 7: La seguridad en la calzada y sus costados. Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña, Universidad Nacional de San Juan, 2010.
- fib Fédération internationale du béton, Model Code 2010 - Final draft: Volume 2, International Federation for Structural Concrete (fib), 2012
- Hao, Y. and Hao, H., Numerical evaluation of the influence of aggregates on concrete compressive strength at high strain rate. *International Journal of Protective Structures*, 2(2):177–206, 2011.
- Herrmann, W., Constitutive equation for the dynamic compaction of ductile porous materials. *Journal Applied Physics*, 40(6):2490–2499, 1969.
- Holschemacher, K., Mueller, T. and Ribakov, Y., Effect of steel fibers on mechanical properties of high strength concrete. *Materials & Design*, 31:2604–2615, 2010.
- Hung, C.C. and Li, S.H., Three-dimensional model for analysis of high performance fiber reinforced cement-based composites. *Composites: Part B*, 45:1441–1447, 2014.
- INTI, CIRSOC 201 Reglamento argentino de estructuras de hormigón. INTI, 2005.
- Marar, K., Eren, Ö and Yitmen, İ., Compression Specific Toughness of Normal Strength Steel Fiber Reinforced Concrete (NSSFRC) and High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete (HSSFRC). *Materials Research*, 14(2): 239–247, 2011.
- AASHTO, *LRFD Bridge design specifications*. American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017.
- Luccioni, B., Araoz, G. and Labanda, N., Defining erosion limit for concrete. *International Journal of Protective Structures*, 4(3):315–340, 2013.
- Luccioni, B., Isla, F., Codina, R., Ambrosini, D., Zerbino, R., Giaccio, G. and Torrijos, C., Effect of steel fibers on static and blast response of high strength concrete. *International Journal of Impact Engineering*, 107:23–37, 2017.
- Luccioni, B., Isla, F., Forni, D., Cadoni, E. Modelling UHPFRC tension behavior under high strain rates. *Cement and Concrete Composites*, 91:209–220, 2018.
- Riedel, W., Kawai, N. and Kondo, K., Numerical assessment for impact strength measurements in concrete materials. *International Journal of Impact Engineering*, 36: 283–293, 2009.
- Tu, Z. and Lu, Y., Evaluation of typical concrete material models used in hydrocodes for high dynamic response simulations. *International Journal of Impact Engineering*, 36:132–146, 2009.