

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO DE VIGAS REPARADAS CON HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS

Gonzalo Ruano^{a,b}, Facundo Isla Calderón^{a,c}, Graciela Giaccio^d y Bibiana Luccioni^{a,c}

^aInstituto de Estructuras, Universidad Nacional de Tucumán, Av. Roca 1800, 4000 S.M. de Tucumán, Argentina, bluccioni@herrera.unt.edu.ar, www.herrera.unt.edu.ar/iest

^bCIUNSa, gonzalo.ruano@gmail.com

^cCONICET, Av Rivadavia 1917, Cdad de Bs. As.

^dCIC – LEMIT Facultad de Ingeniería UNLP

Palabras clave: viga, compuestos, modelo numérico, reparación, hormigón reforzado con fibras

Resumen. La aptitud del hormigón reforzado con fibras como material de reparación está respaldada por sus cualidades y propiedades mecánicas como ser mayor tenacidad que el hormigón convencional, patrón de fisuración extendido pero con fisuras de menor ancho, aporte en la resistencia a tracción y corte, buen desempeño en ensayos de adherencia con diferentes substratos y bajo riesgo de corrosión. Pocos trabajos abordan la reparación con este material. La principal limitación en el uso práctico es la falta de herramientas que permitan predecir el comportamiento de estructuras reparadas con este material.

En este trabajo se presentan la simulación numérica y comparación con resultados experimentales del comportamiento de dos vigas de hormigón armado ensayadas a corte hasta la rotura, luego reparadas con un encamisado de hormigón reforzado con fibras, y ensayadas nuevamente para evaluar la eficiencia de la reparación. Se reproduce numéricamente el proceso completo, es decir los ensayos de las vigas de hormigón armado hasta dañarlas a corte, la descarga, la reparación con hormigón reforzado con fibras y el comportamiento de las vigas reforzadas. Para esto se trabaja con un programa de elementos finitos no lineal modificado mediante la incorporación de un algoritmo para simular el proceso de reparación que supone cambios en la geometría y en los materiales.

Tanto el hormigón armado tradicional como el hormigón reforzado con fibras se modelan mediante la teoría de mezclas modificada para materiales anisótropos que permite tener en cuenta el comportamiento de las fibras de manera aproximada. Para la obtención de los parámetros intervinientes en estos modelos se utilizan los resultados experimentales de ensayos de caracterización de los materiales.

En el trabajo se describen los modelos materiales y el esquema usado para simular la reparación. Se presenta la calibración de los parámetros de los materiales, los resultados de la simulación de las vigas originales y reparadas y su contraste con los resultados experimentales. Dicha comparación permite validar la herramienta numérica que resulta útil para el diseño de este tipo de reparación.

1 INTRODUCCIÓN

Una estructura puede necesitar refuerzo o reparación debido a múltiples causas. En general el refuerzo de estructuras está asociado a la necesidad de prolongar la vida útil ya sea por mayores requerimientos debido a actualizaciones en la normativa o por cambios de destino. Por otro lado, la necesidad de reparar estructuras puede originarse, por ejemplo, por envejecimiento de los materiales o por distintos tipos de deterioro provocados por solicitaciones no previstas en el diseño. Entre las tipologías constructivas más usadas se encuentran las estructuras de hormigón armado. Una alternativa para el refuerzo y/o reparación de estas estructuras es el uso de hormigón reforzado con fibras (HRF) de acero.

El HRF es un material compuesto por hormigón más la adición de fibras que resulta apto para refuerzo y/o reparación debido a que presenta mayor tenacidad que el hormigón convencional, patrón de fisuración extendido pero con fisuras de menor ancho (Altun et al., 2007), modo de falla dúctil (Lee, 2006), capacidad para resistir al corte (Juárez et al., 2006), resistencia a cargas cíclicas y mantenimiento de integridad (Campione y Mangiavillano, 2008), alta resistencia a abrasión, excelente desempeño frente a ciclos de congelación y deshielo, resistencia a arrancamiento de barras, buen desempeño en ensayos de adherencia con diferentes substratos (Wang y Lee, 2007). Otra ventaja de las fibras es que, a diferencia de las armaduras convencionales, prácticamente no presentan riesgos de corrosión y este material puede ser colocado en espesores menores que una capa de hormigón con armadura tradicional (Nguyen et al., 2010).

Prácticamente no existen modelos que permitan diseñar este material (tipo y proporción de fibras) acorde a la aplicación que se busque, ni verificar los elementos diseñados. Mientras el comportamiento del hormigón bajo cargas multiaxiales ha sido relativamente bien estudiado, documentado y modelado por numerosos investigadores, los ensayos de HRF bajo cargas multiaxiales y los modelos desarrollados para predecir su comportamiento y las tensiones y deformaciones bajo dichas condiciones de carga son aún muy pocos (Swaddiwudhipong y Seow Puay, 2006).

Algunos trabajos recientes presentan la modelación numérica de HRF utilizando modelos originalmente desarrollados para hormigón como el modelo de microplanos (Liu et al., 2009), modelos multifisuras distribuidas (Chalioris y Karayannis, 2009), modelos de fisuras discretas, modelos plásticos como el modelo de Willam-Warnke (Özcan et al., 2009), modelos de hormigón confinado (Tokgoz y Dundar, 2010), modelos no lineales calibrados con resultados experimentales de ensayos de compresión y tracción (Campione y Mangiavillano, 2008) u obtención del comportamiento uniaxial mediante análisis inverso (Santos et al., 2008). En otros trabajos se desarrollan modelos de daño continuo simples basados en resultados experimentales con distintos volúmenes de fibras y velocidades de deformación (Wang et al., 2008). En ningún caso, estos modelos incluyen la modelación explícita de la influencia de la adición de fibras, su proporción ni orientación.

En la bibliografía existen pocos trabajos referidos a reparación con HRF, y menos aún trabajos que traten daño frente a solicitaciones mecánicas, en especial de corte. Tampoco se encuentran aplicaciones de estos modelos a la simulación del comportamiento de elementos reparados o reforzados con HRF. Se destaca el trabajo de Martinola et al., (2010) que trata el refuerzo de vigas de hormigón armado sometidas a flexión de cuatro puntos con hormigón de alta performance reforzado con fibras presentando la simulación numérica y comparación con la reparación de una viga solicitada inicialmente hasta alcanzar la fluencia de la armadura longitudinal.

En el presente trabajo se reproduce numéricamente el comportamiento de dos vigas de hormigón armado ensayadas a rotura por corte, reparadas con un encamisado de hormigón reforzado con fibras y ensayadas nuevamente. La contribución de las fibras en el HRF es tenida en cuenta de forma aproximada discriminando proporción y orientación de fibras.

En primer lugar se describen los ensayos experimentales. Luego se presenta el modelo constitutivo utilizado y el algoritmo desarrollado para simular la reparación. Se presenta la calibración de los parámetros de los materiales, los resultados de la simulación de las vigas originales y reparadas y su contraste con los resultados experimentales. Dicha comparación permite validar la herramienta numérica que resulta útil para el diseño de este tipo de reparación.

2 ENSAYOS

Se construyeron dos vigas idénticas de hormigón armado de dimensiones 1600x250x150mm bajo la premisa de que fallen por corte y no por flexión. Para lograr esto se usó elevada cuantía longitudinal y estriado mínimo según norma CIRSOC 201 (2005). Junto con las vigas se moldearon probetas cilíndricas $\phi 100 \times 200$ mm y vigas prismáticas 150x150x600mm para la caracterización del hormigón y el hormigón con fibras en compresión (norma C 469 – 87a) y flexión (norma EN 14651:2005:E) respectivamente. El hormigón usado en la construcción corresponde a un H-30 autocompactante. Se utilizó acero conformado tipo ADN-420 nervurado en barras. La armadura longitudinal estaba compuesta por tres barras $\phi 16$ mm con anclaje de gancho en ángulo recto en la parte inferior y dos barras rectas $\phi 8$ mm en la parte superior; como armadura transversal se usaron estribos $\phi 6$ mm de dos ramas cada 125mm (ver Figura 1(a)).

Las vigas fueron ensayadas con carga asimétrica a flexión de tres puntos con luz entre apoyos de 1200mm y relación $a/d=1.78$ hasta la rotura (Figura 1(b)). Durante los ensayos se registró la flecha en el punto de aplicación de la carga midiendo los desplazamientos verticales a la altura del eje longitudinal de la viga. Las vigas fueron cargadas con una carga inicial creciente hasta alcanzar los 30kN y desde ese punto se continuó con control de desplazamiento.

La reparación de las vigas se realizó mediante un encamisado de hormigón de características similares al original reforzado con fibras de acero y autocompactante. Se utilizaron fibras de acero de 1.0mm de diámetro y 50mm de longitud con ganchos en los extremos, en una proporción de 40kg fibra/m³ de hormigón lo cual equivale a una proporción de 0.5% en volumen. El espesor del encamisado usado fue de 3cm en los laterales y fondo de las vigas (Figura 1(c)). Para asegurar la unión de los materiales de distinta edad se utilizaron conectores de acero en ambas caras laterales anclados mediante un producto químico y además un puente de adherencia en la superficie. La secuencia de carga de las vigas reparadas se realizó de manera análoga al caso de las vigas originales y los desplazamientos también fueron medidos en el eje de la viga.

Las vigas originales alcanzaron cargas máximas de 267kN y 274kN. En la Figura 2 se muestran las curvas carga-desplazamiento del punto de aplicación de la carga obtenidas para las dos vigas ensayadas. En estas vigas se vio marcada fisuración diagonal del lado de menor relación luz de corte / altura útil (a/d) en una banda que unía los puntos de aplicación de carga y el borde del apoyo. Este tipo de falla es similar a la falla Tipo III observada en vigas sin armadura transversal (Llopiz, 2008) pero sin llegar a darse falla por compresión del hormigón. Las fisuras aumentaban en ancho y número con el incremento de

desplazamiento impuesto. Del lado de mayor luz de corte la fisuración fue diagonal en la parte superior y media de la viga y vertical en la parte inferior (fisuras de corte por flexión). Estas fisuras eran menos, de menor ancho y prácticamente desaparecieron al retirar la carga.

En la Figura 2 se muestran también las curvas carga-flecha obtenidas para las vigas reparadas. Se observa que si bien las vigas reparadas muestran degradación de la rigidez inicial, la reparación con HRF permite obtener un alto porcentaje de restitución de la capacidad portante. En las vigas reparadas se observó también formación de fisuras diagonales entre el punto de aplicación de la carga y el borde del casquete del apoyo. Con el aumento del desplazamiento impuesto también aumentó el ancho de las fisuras pero en este caso era posible ver las fibras que cosían las fisuras. Del lado de mayor relación a/d se observaron mínimas fisuras de corte por flexión.

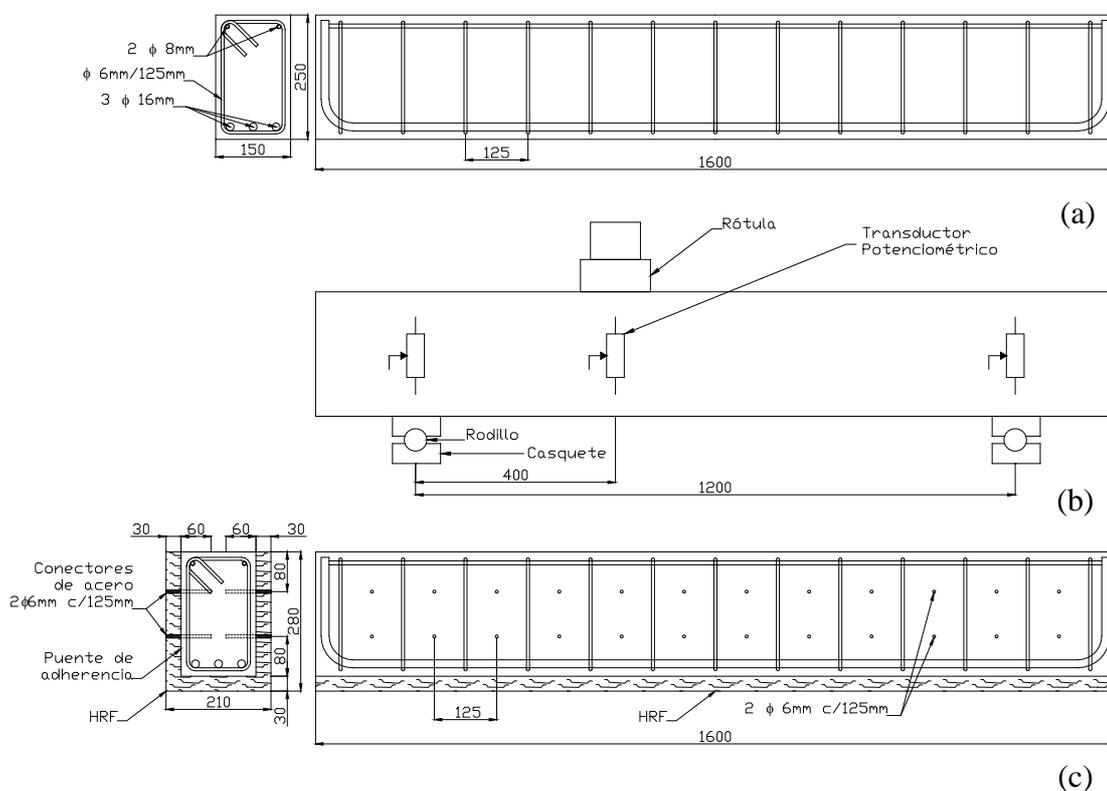


Figura1. (a) Detalle armadura. (b) Esquema de montaje e instrumentación. (c) Detalle Viga Reparada con HRF.

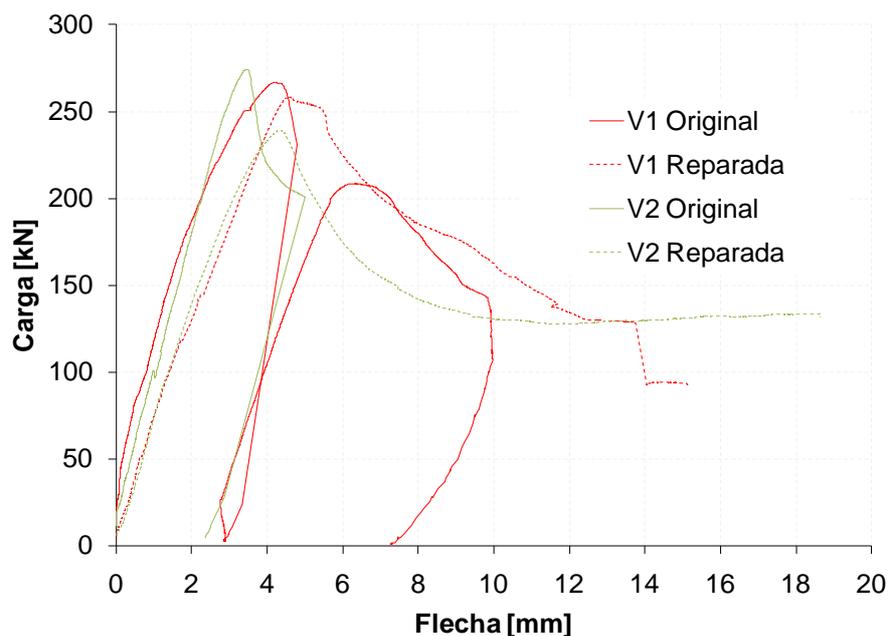


Figura 2. Carga-Desplazamiento Vigas Originales y Reparadas

3 ANÁLISIS NUMÉRICO

3.1 Modelo de material compuesto

El hormigón con fibras puede ser considerado como un material compuesto con una matriz de hormigón y fibras cortas con distintas orientaciones dispersas en el volumen.

Una forma simple de modelar el comportamiento de materiales compuestos es la teoría de mezclas. En este trabajo se utiliza la teoría de mezclas de materiales ortótropos para obtener el comportamiento del hormigón con fibras llevando cuenta de lo que ocurre en el hormigón y lo que ocurre en las fibras. En particular se tiene en cuenta la anisotropía y el posible deslizamiento de las fibras de manera simplificada.

La teoría de mezclas para materiales permite considerar el comportamiento simultáneo de todas las fases de un compuesto y a partir de la combinación de los mismos obtener el comportamiento del conjunto. Cada una de las sustancias básicas puede tener una ley constitutiva propia, isótropa o anisótropa.

La teoría de mezclas de sustancias básicas en su forma clásica se basa en las siguientes hipótesis:

- i. En cada volumen infinitesimal del compuesto participan el conjunto de sustancias componentes.
- ii. Cada componente contribuye en el comportamiento del compuesto en la misma proporción que su participación volumétrica.
- iii. El volumen ocupado por cada componente es menor que el volumen ocupado por el compuesto.
- iv. Todos los componentes poseen la misma deformación (ecuación de cierre o compatibilidad).

Para pequeñas deformaciones, la última hipótesis se escribe como:

$$\varepsilon_{ij} = (\varepsilon_{ij})_1 = (\varepsilon_{ij})_2 = \dots = (\varepsilon_{ij})_n \quad (1)$$

donde ε_{ij} y $(\varepsilon_{ij})_n$ son los tensores de deformación del conjunto y de la n-ésima componente del material.

Por otro lado, la energía libre por unidad de volumen del compuesto puede escribirse como (Truesdell y Toupin, 1960)

$$\Psi(\varepsilon_{ij}, \alpha_i) = \sum_{c=1}^n k_c \Psi_c(\varepsilon_{ij}, \alpha_{ci}) \quad (2)$$

donde $\Psi_c(\varepsilon_{ij}, \alpha_{ci})$ es la energía libre por unidad de volumen correspondiente a cada una de

las n sustancias componentes, $k_c = \frac{dV_c}{dV}$ su fracción de volumen y α_{ci} un conjunto de variables internas correspondiente a dicha componente.

La ecuación constitutiva secante puede obtenerse a partir de las relaciones de Coleman que garantizan el cumplimiento de la desigualdad de Clausius Duhem (Lubliner, 1972):

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \Psi(\varepsilon_{kl}, \alpha_k)}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sum_{c=1}^n k_c \frac{\partial \Psi_c(\varepsilon_{kl}, \alpha_{kc})}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sum_{c=1}^n k_c (\sigma_{ij})_c \quad (3)$$

donde las tensiones en cada una de las componentes $(\sigma_{ij})_c$ se obtienen de las ecuaciones constitutivas correspondientes. Para el hormigón se utilizó el modelo de daño plástico modificado y para las fibras de acero un modelo elastoplástico ortótropo en el que se considera el deslizamiento de las fibras de manera simplificada.

3.2 Modelo constitutivo utilizado para el hormigón

Para el Hormigón se utiliza el modelo de daño plástico modificado (Luccioni y Rougier, 2006), (Rougier y Luccioni, 2007) que permite simular el comportamiento de materiales friccionales del tipo del hormigón sometido a altos niveles de confinamiento.

Es un modelo termodinámicamente consistente y deriva de una generalización de la teoría clásica de la plasticidad (Oller, 1988; Lubliner et al., 1989; Luccioni et al., 1996)

La adopción de una función de fluencia de segundo grado en las componentes del tensor de tensiones, obtenida a partir de una modificación del criterio de fluencia de Lubliner-Oller (Oller et al., 1988), permite alcanzar valores de resistencia última muy próximos a los resultados obtenidos experimentalmente para hormigón simple.

El proceso plástico se describe a partir de una generalización de la teoría de la plasticidad clásica que permite tener en cuenta algunos aspectos del comportamiento de geomateriales.

El límite del comportamiento elástico se describe a través de una función de fluencia:

$$F(\sigma_{ij}; \alpha_k) = f(\sigma_{ij}) - K(\sigma_{ij}; \alpha_k) \leq 0 \quad (4)$$

donde $f(\sigma_{ij})$ es la tensión equivalente definida en el espacio de tensiones. En este trabajo se utiliza el criterio de Lubliner-Oller modificado (Luccioni y Rougier, 2006). $K^p(\sigma_{ij}; \alpha_k)$

es el umbral de fluencia y κ^p es la variable de daño plástico o variable de endurecimiento isótropo.

Se definen las siguientes reglas de evolución para las deformaciones plásticas y la variable de daño plástico:

$$\dot{\varepsilon}_{ij}^p = \dot{\lambda} \frac{\partial G(\sigma_{mn}; \kappa^p)}{\partial \sigma_{ij}} \tag{5}$$

$$\dot{\alpha}_k = \dot{\lambda} H_k(\sigma_{ij}; \alpha_m) = \dot{\lambda} \left(h_k \right)_{ij} \frac{\partial G(\sigma_{mn}; \alpha_l)}{\partial \sigma_{ij}} \tag{6}$$

donde $\dot{\lambda}$ es el factor de consistencia plástica, G la función de potencial y $(h_k^p)_{ij}$ es un tensor que define la evolución de la variable de endurecimiento plástico.

La variable de endurecimiento plástico κ^p se obtiene normalizando la energía disipada en el proceso plástico a la unidad y varía entre 0 para el material virgen y 1 cuando se ha disipado plásticamente la totalidad de la energía que el material es capaz de disipar de esta forma. La regla de evolución de la variable de endurecimiento plástico tiene en cuenta el comportamiento diferenciado en tracción y compresión y permite simular adecuadamente la disipación de energía en compresión triaxial de materiales como mortero o ladrillos cerámicos:

$$\dot{\kappa}^p = \left[\frac{r}{g_f^{*p}} + \frac{(1-r)}{g_c^{*p}} \right] \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \tag{7}$$

donde:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^3 \langle \sigma_i \rangle}{\sum_{i=1}^3 |\sigma_i|} \quad \langle \sigma_i \rangle = \frac{1}{2} [\sigma_i + |\sigma_i|] \tag{8}$$

σ_i : son las tensiones principales

$$g_f^{*p} = \left(\frac{\sum_{i=1}^3 |\sigma_i| R^{op}}{f^p(\sigma_{ij})} \right)^{1+H(-r)} \quad g_c^{*p} = \left(\frac{\sum_{i=1}^3 |\sigma_i|}{f^p(\sigma_{ij})} \right)^{1+H(-r)} \tag{9}$$

$$H(-r) \begin{cases} = 0 & \text{si } r > 0 \\ = 1 & \text{si } r \leq 0 \end{cases}$$

R^{op} es la relación entre los umbrales de fluencia en compresión uniaxial y en tracción uniaxial, g_f^p y g_c^p son las máximas densidades de energía disipadas por el proceso plástico

en tracción uniaxial y compresión uniaxial respectivamente.

Estas energías pueden ser evaluadas como:

$$g_f^p = \frac{G_f}{l_c} \quad y \quad g_c^p = \frac{G_c}{l_c} \quad (10)$$

donde G_f y G_c son las energías de fractura y aplastamiento respectivamente y l_c es un parámetro externo que depende del tamaño característico de la malla de elementos finitos y se introduce para obtener objetividad de la respuesta del sólido respecto del tamaño de la malla.

Se utiliza la siguiente regla de evolución para el umbral de fluencia equivalente:

$$K(\sigma_{ij}, \kappa^p) = r \sigma_t(\kappa^p) + (1-r) \sigma_c(\kappa^p) \quad (11)$$

donde $\sigma_t(\kappa^p)$ y $\sigma_c(\kappa^p)$ representan la evolución de los umbrales de fluencia en ensayos de tracción y compresión uniaxial respectivamente.

Las condiciones de carga/descarga se derivan de las relaciones de Kuhn-Tucker formuladas para problemas con restricciones unilaterales:

$$\dot{\lambda} \geq 0 \quad F^p \leq 0 \quad \dot{\lambda} F^p = 0 \quad (12)$$

3.3 Modelo constitutivo utilizado para las fibras

La teoría de mezclas clásica supone que todas las componentes tienen la misma deformación. Esto funciona relativamente bien en materiales compuestos con fibras largas cuando la sollicitación coincide con la dirección de las fibras. Sin embargo, a medida que la relación de aspecto de las fibras disminuye, el efecto de los extremos se hace progresivamente significativo ya que los campos de tensiones y deformaciones se modifican a causa de la discontinuidad. Este efecto es todavía más complejo en el caso de las fibras de acero estudiadas que presentan un gancho en la punta (Chanvillard, 1999; Naaman, 2003). Debido a estos fenómenos la condición de compatibilidad expresada en la expresión (1) no se cumple exactamente.

Una forma de simular aproximadamente el comportamiento del hormigón con fibras utilizando la teoría de mezclas es modificar las ecuaciones constitutivas de las fibras (Isla Calderón y Luccioni, 2008). Teniendo en cuenta que en este caso las fibras se deslizan antes de entrar en fluencia, se modifica el modelo elastoplástico isótropo convencional del acero reduciendo la tensión de fluencia en la dirección axial de las fibras. De esta manera, el umbral de plasticidad en esta dirección representa, en realidad, el umbral de deslizamiento de las fibras respecto del hormigón. El endurecimiento en esa dirección depende de los distintos mecanismos que se desarrollan en el proceso de arrancamiento y se puede calibrarse aproximadamente con una recta.

Partiendo de las consideraciones anteriores, para las fibras de acero se utiliza un modelo elastoplástico para materiales ortótropos. De esta manera, se pueden tener en cuenta, no sólo la ortotropía elástica propia de la geometría de la fibra que sólo contribuye a resistir tensiones en la dirección axial, sino también la ortotropía en los umbrales de comportamiento inelástico que surge cuando se introduce el umbral de deslizamiento, menor a la tensión de fluencia, en la dirección axial de las fibras.

El modelo parte de la hipótesis de que existen dos espacios (Betten, 1988; Luccioni et al., 1995): a) un espacio anisótropo real y b) un espacio ficticio isótropo. El problema se resuelve en el espacio isótropo ficticio lo que permite utilizar modelos elastoplásticos y de daño desarrollados para materiales isótropos.

Los tensores de tensión en ambos espacios están relacionados mediante una transformación del tipo:

$$\tau_{ij} = A_{ijkl}(\sigma_{ij}, \kappa^p) \sigma_{kl} \quad (13)$$

donde τ_{ij} y σ_{kl} son los tensores de tensión en los espacios ficticio y real respectivamente y A_{ijkl} es un tensor de cuarto orden, que contiene la información sobre la anisotropía del material. En el caso más general, este tensor es función del tipo de estado tensional y de la evolución del proceso elastoplástico a través de la variable de daño plástico κ^p (Luccioni et al., 1996), que hace las veces de variable de endurecimiento plástico isótropo.

El umbral de comienzo de comportamiento plástico o de daño se define mediante una función de fluencia o de daño:

$$F(\sigma_{ij}, \alpha) = \bar{F}(\tau_{ij}, \bar{\alpha}) = 0 \quad (14)$$

donde: F y \bar{F} designan las funciones de fluencia en los espacios anisótropo real e isótropo ficticio, y α y $\bar{\alpha}$ son variables internas correspondientes a dichos espacios.

La transformación de espacios definida por la ecuación (13) permite utilizar funciones de fluencia \bar{F} definidas para materiales isótropos en el espacio isótropo ficticio. Debe notarse, que dicho espacio es isótropo en cuanto a umbrales de comportamiento plástico, pero no necesariamente respecto a otras propiedades, como la rigidez elástica, por ejemplo.

La deformación plástica en el espacio real se calcula mediante la regla del flujo:

$$\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} \quad (15)$$

donde G es la función de potencial definida en el espacio de tensiones reales. En lugar de trabajar con esta función que debe ser anisótropa, se puede trabajar con una función de potencial \bar{G} definida en el espacio isótropo ficticio tal que:

$$G(\sigma_{ij}; \alpha_k) = \bar{G}(\tau_{ij}; \bar{\alpha}_k) \quad (16)$$

La ecuación (15) se escribe entonces:

$$\varepsilon_{ij}^p = \lambda \frac{\partial \bar{G}}{\partial \sigma_{ij}} = \lambda \frac{\partial \bar{G}}{\partial \tau_{kl}} \frac{\partial \tau_{kl}}{\partial \sigma_{ij}} = \lambda \frac{\partial \bar{G}}{\partial \tau_{kl}} H_{kl ij} = \lambda R_{ij} \quad (17)$$

donde:

$$H_{kl ij} = \frac{\partial \tau_{kl}}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial (A_{klmn} \sigma_{mn})}{\partial \sigma_{ij}} = A_{kl ij} + \frac{\partial A_{klmn}}{\partial \sigma_{ij}} \sigma_{mn} \quad (18)$$

De manera análoga, la ley de evolución de las variables internas se escribe como:

$$\alpha_m = \dot{\bar{\alpha}} = \lambda \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} = \lambda h_{ij}^m \frac{\partial \bar{G}}{\partial \tau_{kl}} \frac{\partial \tau_{kl}}{\partial \sigma_{ij}} = \lambda h_{ij}^m R_{ij} \quad (19)$$

3.4 Calibración de las propiedades mecánicas con resultados de probetas

En la Figura 3(a) se muestra la malla de elementos finitos (EF) usada para la calibración de propiedades a compresión del hormigón de la viga original y el hormigón simple usado en la reparación. Se utilizaron 2 elementos planos de 50x50mm en axil simetría y solo se modela ¼ de la probeta; se observan también las condiciones de apoyo debidas a la simetría usada y los apoyos necesarios para la aplicación de los desplazamientos impuestos. Las Figuras 3 (b), (c) y (d) muestran las curvas tensión deformación obtenidas experimentalmente y comparación con la respuesta numérica. En la práctica al incorporar fibras al hormigón es común que, como en este caso, no se logre aumento de resistencia por problemas en la compactación. Como resultado de ello, la resistencia a compresión uniaxial del HRF puede resultar levemente inferior a la del mismo hormigón sin fibras. Este hecho no puede ser representado por los modelos numéricos que parten de la hipótesis de una adecuada compactación. En Figura 3 (d) se muestra que numéricamente el HRF evidencia mayor resistencia y capacidad de deformación que el hormigón simple. Esta respuesta se corresponde con las mejoras esperadas en las propiedades del hormigón por efecto de la incorporación de fibras al mismo. A pesar de las diferencias mencionadas, se logra reproducir adecuadamente la respuesta de los tres tipos de hormigón en compresión uniaxial.

En Figura 4 (a) se muestra la malla de EF usada para la calibración de propiedades a flexión del hormigón de la viga original, del hormigón simple de la reparación y del HRF usado en la reparación. Nuevamente se provecha la simetría del ensayo y se modela solo ½ viga, se usan en este caso elementos planos cuadrados de 25x25mm en estado plano de tensiones; se pueden apreciar las condiciones de borde de apoyos y simetría. En la parte superior del eje se advierte restricción en ambas direcciones para poder aplicar los desplazamientos impuestos y en la parte inferior no hay restricciones pues de esta manera se simula la fisura. En las Figuras 3 (b) y (c) se muestran las curvas carga-apertura de fisuras obtenidas para los tres tipos de hormigón. Se observa el cambio del comportamiento en flexión provocado por las fibras que permiten mantener carga luego del pico. Se logra ajustar muy bien la respuesta del modelo numérico con la experimental.

En Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros calibrados a partir de estos ensayos y los medidos experimentalmente.

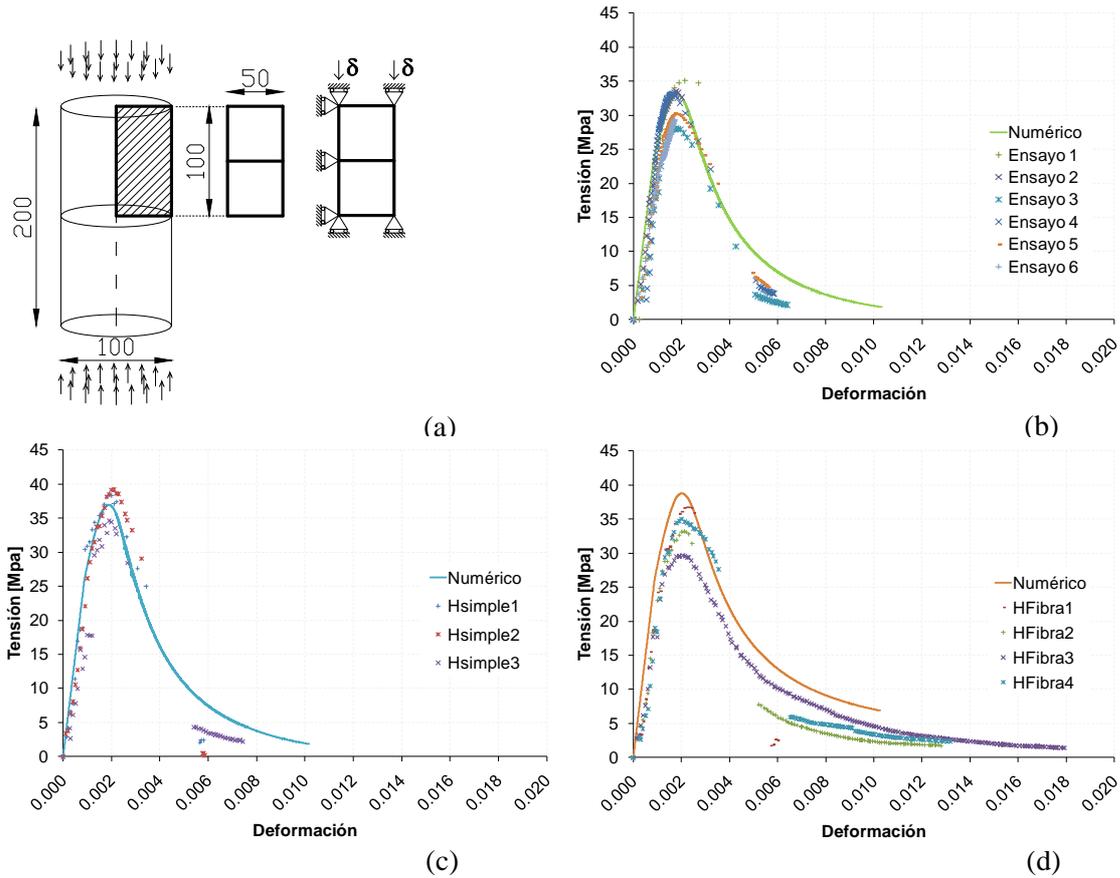


Figura 3. (a) Malla EF Compresión. Curvas tensión deformación en compresión uniaxial. (b) Hormigón simple Viga Original; (c) Hormigón autocompactante simple de Reparación; (d) Hormigón autocompactante con fibras utilizado en la Reparación.

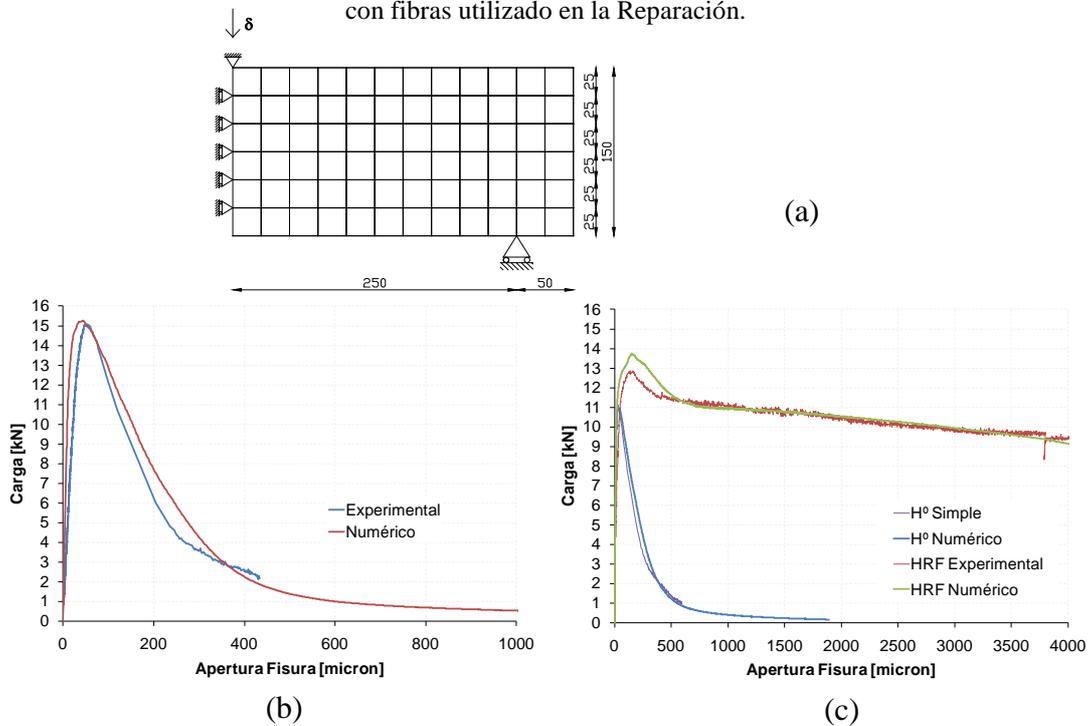


Figura 4. (a) Malla EF Flexión. Curvas Carga-Apertura de Fisura. (b) Hormigón Viga Original. (c) Ho Simple y HRF Reparación.

Propiedades	Hormigón		Acero	Fibras
	Original	Reparación	Barras	Reparación
Módulo de Elasticidad, E [MPa]	28000	29500	200000	200000
Coefficiente de Poisson, ν	0.2	0.2	0.2	0.2
Resist. última a tracción, σ_{ut} [MPa]	-	-	-	1000.0
Resist. última a compresión, σ_{uc} [MPa]	33.0	37.0	-	1000.0
Tensión umbral de fluencia en compresión, σ_{fc} [MPa]	23	26	480.0	360
Relación de resistencias inicial (compresión/tracción), R^{0p}	9.5	17	1	1
Función de Fluencia	Lubliner-Oller	Lubliner-Oller	Von Mises	Von Mises
Relación resistencia (equibiaxial/resistencia uniaxial) compresión, R_{bc}	1.16	1.16	-	-
Parámetro controlador del radio del plano octaédrico (Luccioni et al., 2005) γ	3.5	3.5	-	-
Curva de endurecimiento en tracción	Exponencial	Exponencial	Lineal Ht=0	Lineal Ht=8000
Curva de endurecimiento en comp.	Exp. c/máximo	Exp. c/máximo	Lineal Ht=0	Lineal Ht=8000
Vble. de endurecimiento plástico para la tensión pico en compresión, κ_{comp}^p	0.15	0.15	-	-
Egía. de fractura, G_f^p [MPa.m]	0.032	0.026	-	-
Egía. de aplastamiento, g_c^p [MPa]	132	142	-	-
Criterio de Potencial	Lubliner-Oller	Lubliner-Oller	Von Mises	Von Mises

Tabla 1. Propiedades Materiales Usados.

3.5 Estrategia de Simulación Numérica de Vigas

Para modelar los ensayos de las vigas se optó por realizar un proceso evolutivo compuesto por dos casos de carga. El primero corresponde a la simulación de las vigas originales y el segundo a la simulación de las vigas reparadas. En ambos casos de carga se utilizó la misma malla de elementos finitos y lo que cambia es el espesor, pues aumenta en el caso de la reparación. Si bien la malla de EF usada en la reparación no describe exactamente la geometría de las vigas reparadas, pues no tiene en cuenta el recubrimiento inferior de HRF, se comprobó que la simplificación adoptada prácticamente no afecta la respuesta ya que las vigas trabajan predominantemente a corte y no flexión. En la malla (Figura 5) se utilizaron elementos cuadrados de 50x50mm en estado plano de tensiones y se pueden distinguir tres bandas correspondientes al cuerpo de la viga, la armadura inferior y la armadura superior como así también las condiciones de apoyo y carga. Cada banda corresponde a un material compuesto por el hormigón de la viga original, el acero en barras longitudinales y estribos, el hormigón de reparación y las fibras metálicas en dirección horizontal y vertical. Se definen dos casos de carga. En el primer caso de carga los materiales componentes del HRF de la reparación tienen proporción volumétrica nula activándose su participación en el segundo caso de carga en el cual se modifican las proporciones de todos los materiales componentes para dar lugar a los materiales de reparación. De esta forma, los materiales componentes del HRF de la reparación no realizan aporte hasta su activación en el segundo caso de carga. Si bien los materiales de la

reparación no participan en la contribución de resistencia, al formar parte del compuesto desde el primer caso de carga, se deforman experimentando tensiones y variación de variables internas que son ficticias pues realmente esos materiales no existen en esa etapa; es por esto que al inicio del segundo caso de carga se vuelven a cero las tensiones y variables internas de los materiales componentes de la reparación. Además al iniciar el segundo caso de carga se inicializan nuevamente en cero los desplazamientos de los nodos de la malla de EF. Si bien en los ensayos quedan deformaciones permanentes, cuando se reparan las vigas y se vuelven a ensayar se toma como referencia para medir los desplazamiento, la viga reparada. En Tabla 2 se muestra el esquema de cálculo usado en la reparación.

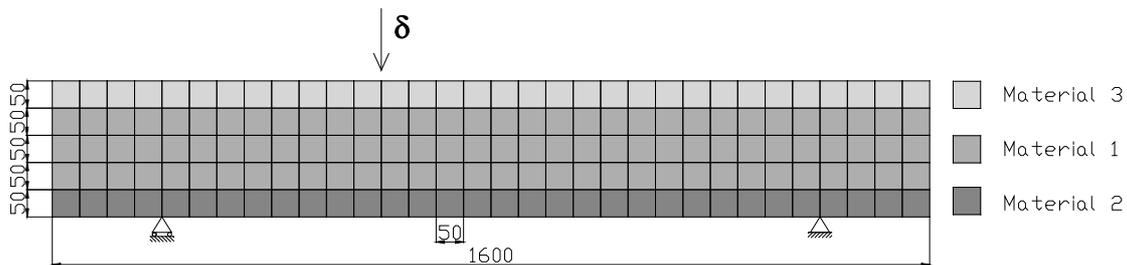


Figura 5. Malla de EF y Condiciones de Borde usada en Simulación Numérica.

1. Inicio 1^{er} Caso de Carga (Viga Original).
 Espesor = Espesor viga original
 k_{orig} : % volumétrico correspondiente a materiales de las Vigas Originales
 $k_{reparación} : 0$
 $\Sigma (k_{orig} + k_{reparación}) = 1.0$
2. Resolución del problema vía MEF.
 Se realizan n incrementos de desplazamiento en el punto de aplicación de la carga.
3. Inicio 2^{do} Caso de Carga (Viga Reparada).
 Espesor = Espesor viga original + reparación
 k_{orig} : Corrección de % de participación volumétrico de materiales originales
 $k_{reparación}$: Activación de % de participación de los materiales de reparación
 $\Sigma (k_{orig} + k_{reparación}) = 1.0$
 Reset de Tensiones y Variables Internas de los materiales de Reparación.
 Reset de los Desplazamiento de la malla de EF.
4. Resolución del problema vía MEF.
 Se realizan n incrementos de desplazamiento en el punto de aplicación de la carga.
5. Fin.

Tabla 2. Esquema de cálculo para modelar la reparación.

4 COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES

4.1 Vigas originales

La Figura 6 muestra la comparación de los resultados numéricos con las curvas carga-flecha obtenidas experimentalmente para las dos vigas de hormigón armado originales. Se puede observar que el modelo reproduce acertadamente el comportamiento elástico y la carga máxima de los ensayos. Se observa, sin embargo, que los resultados numéricos se apartan de los experimentales en la rama descendente (post-pico) de la respuesta. Se puede demostrar que la pendiente de esta curva depende de la energía de aplastamiento del hormigón mientras que la resistencia residual depende fundamentalmente de la curva de endurecimiento del acero.

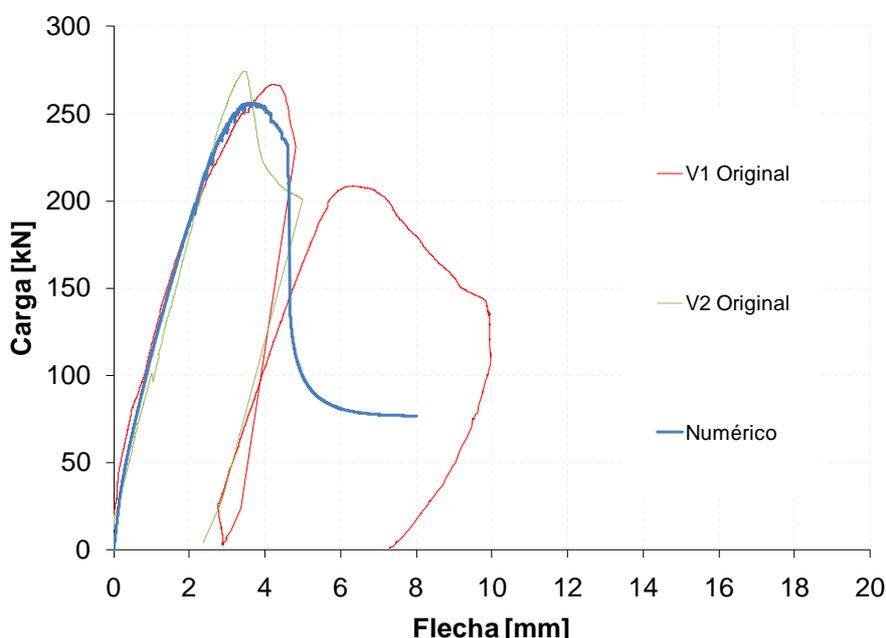


Figura 6. Vigas Originales. Comparación de resultados numéricos y experimentales.

4.2 Vigas Reparadas

En Figura 7 se presenta la comparación de las curvas carga-flecha obtenida numéricamente con los resultados experimentales para las vigas reparadas y ensayadas nuevamente. Los resultados numéricos aproximan razonablemente la carga máxima alcanzada en los ensayos pero no reproducen adecuadamente la curva carga-desplazamiento evidenciando una rigidez mayor que la realmente alcanzada en los ensayos. Para poder reproducir la degradación de rigidez que evidencian las vigas dañadas y posteriormente reparadas en relación con las vigas originales, es necesario utilizar para el hormigón un modelo que considere degradación de rigidez como el modelo de plasticidad y daño acoplado (Luciconi et al., 1996, Luccioni y Rougier, 2005). En un trabajo anterior (Ruano et al., 2010) se presentó una estimación aproximada del daño promedio de las propiedades del material en la primera etapa de carga de las vigas que se corresponde con la pérdida de rigidez evidenciada cuando las vigas son reparadas y reensayadas. Actualmente se está

trabajando en la calibración de un modelo de daño y plasticidad acoplada que reproduzca no sólo el desarrollo de deformaciones permanentes sino también la degradación de las propiedades elásticas en la primera carga, fenómenos ambos irreversibles que no pueden ser borrados por el tipo de reparación en estudio.

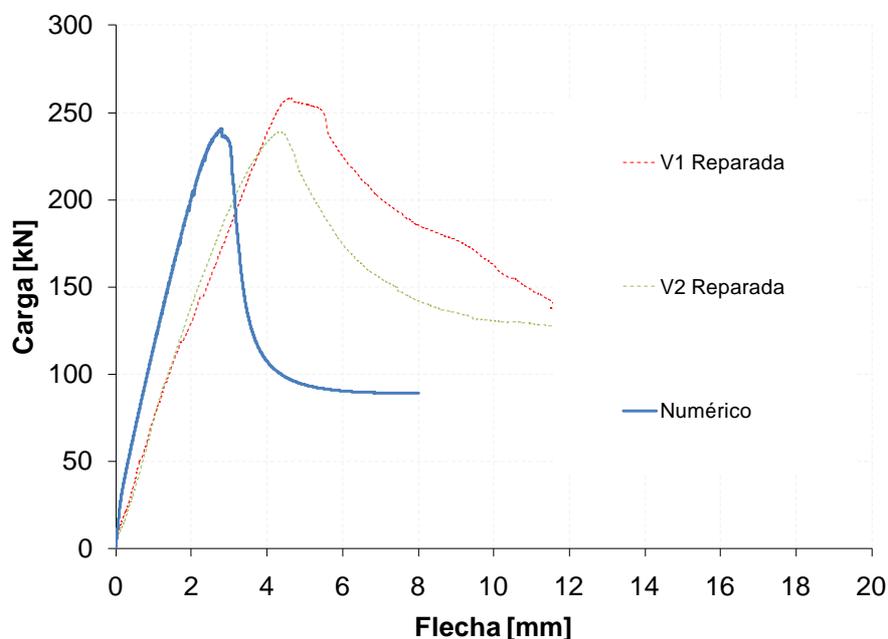


Figura 7. Vigas Reparadas. Comparación Numérica - Experimental.

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta una forma de simular numéricamente el comportamiento de elementos estructurales ensayados bajo dos ciclos de carga, el primero representa el elemento estructural original y el segundo el elemento reparado, en este caso reparado con HRF.

La forma de modelar la contribución de las fibras en el HRF es sencilla y posibilita reproducir los ensayos de caracterización con precisión razonable.

Mediante el algoritmo planteado es posible conservar las variables internas de los materiales constituyentes del primer ciclo, que son las que describen los cambios sufridos por los materiales, y gracias a esto se puede representar objetivamente el comportamiento de los materiales originales durante el ensayo reparado.

La forma de trabajo utilizada resulta útil en la reproducción numérica de los ensayos realizados y brinda estimaciones acertadas de la carga máxima esperada, siendo por lo tanto una buena herramienta numérica para la predicción del comportamiento de elementos reparados.

Para poder reproducir la curva carga-desplazamiento (rigidez, curva post-pico, resistencia residual) es necesario trabajar con modelos que tengan en cuenta fenómenos como la degradación de rigidez y el deslizamiento de las armaduras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de

Tucumán (CIUNT), al Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Salta (CIUNSa, proyecto 1903) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científico Técnicas (CONICET) por el apoyo económico recibido y a Maccaferri de Argentina S.A. que provee las fibras para los ensayos.

REFERENCIAS

- Altun Fatih, Haktanir Tefaruk, Ari Kamura, Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams, *Construction and Building Materials* 21, 654–661, 2007.
- Betten J., Application of tensor functions to the formulation of yield criteria for anisotropic materials, *International Journal of Plasticity*, 4 29-46, 1988.
- C 469 – 87a, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson`s Ratio of Concrete in Compression.
- Campione G., Mangiavillano M.L., Fibrous reinforced concrete beams in flexure: Experimental investigation, analytical modelling and design considerations, *Eng. Struct.* 30, (2008) 2970–2980, 2008.
- Campione Giuseppe, Mangiavillano Maria Letizia, Fibrous reinforced concrete beams in flexure: Experimental investigation, analytical modelling and design considerations, *Engineering Structures* 30, 2970–2980, 2008.
- Chalioris Constantini E. and Karayannis Chris G., Efectiveness of the use of steel fibers on the torsional behaviour of flanged concrete beams, *Cement & Concrete Composites* 31, (2009) 331-341, 2009.
- Chanvillard G., Modeling the pullout of wire-drawn steel fibers, *Cement and Concrete Research* 29, 1027–1037, 1999.
- CIRSOC (2005), Reglamento Argentino para Estructuras de Hormigón, 2005.
- EN 14651:2005:E, Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual), CEN 2005.
- Isla Calderón F. and Luccioni B., *Modelo para hormigones reforzados con fibras*, ENIEF 2008 San Luis Argentina, 2008.
- Juárez C., Valdez P., Durán A., and Sobolev K., The diagonal tension behavior of fiber reinforced concrete beams, doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.12.009, 2006.
- Lee Hyun-Ho, Shear strength and behavior of steel fiber reinforced concrete columns under seismic loading, doi:10.1016/j.engstruct.2006.08.016, 2006.
- Liu Haibo, Xiang Tianyu, Zhao Renda, Research on non-linear structural behaviors of prestressed concrete beams made of high strength and steel fiber reinforced concretes, *Construction and Building Materials* 23, (2009) 85–95, 2009.
- Llopiz Carlos Ricardo. Hormigón I Unidad 6: Análisis y Diseño al Corte, *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza Argentina*, 2008.
- Lubliner J., Oliver J., Oller S. and Oñate E., A plastic damage model for concrete, *Int. J. Solids Struct.*, 25(3):299-326, 1989.
- Lubliner J., On the Thermodynamic Foundations of Non-Linear Mechanics, *Int. Journal Non Linear Mechanics*, Vol.7, 237-254, 1972.
- Luccioni B. M., Rougier V. C., Numerical assessment of frp retrofitting systems for reinforced concrete elements, *Engineering Structures*, 29: 1664-1675, 2007.
- Luccioni B., Oller S., Danesi R., Coupled plastic damage model, *Comput., Methods Appl. Mech. Engrg.*, 129:81-89, 1996.

- Luccioni B., Rougier, V., A plastic damage approach for confined concrete. *Computer & Structures*, 83, 2238-2256, 2005.
- Martinola Giovanni, Meda Alberto, Plizzari Giovanni A. and Rinaldi Zila, Strengthening and Repair of RC Beams with Fiber Reinforced Concrete, *Cement & Concrete Composites*, doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.07.001, 2010.
- Naaman A., Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites, *Journal of Advanced Concrete Technology Japan Concrete Institut*, Vol. 1, No. 3, 241-252, 2003.
- Nguyen T-H., Toumi A. and Turatsinze. A., Mechanical properties of steel fibre reinforced and rubberised cement-based mortars, *Materials & Design Vol. 31 Issue1*, January 2010, Pages 641-647, 2010.
- Oller S., Un modelo de Daño Continuo para materiales Friccionales, Ph.D. Thesis. *Universitat Politecnica de Catalunya, Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals I Ports, Spain*, 2002.
- Özcan D. Mehmet, Bayraktar Alemdar, Sahin Abdurrahman, Haktanir Tefaruk, Türker Temel, Experimental and finite element analysis on the steel fiber-reinforced concrete (SFRC) beams ultimate behavior, *Construction and Building Materials* 23, (2009) 1064–1077, 2009.
- Ruano G., Isla F., Sfer D. y Luccioni B., Vigas de hormigón armado reparadas con hormigón reforzado con fibras de acero ensayadas a corte, *XXXIV Jornadas de Ingeniería Estructural, San Juan, Argentina*, En prensa 2010.
- Santos Simao P. F., Barros Joaquim A. O. y Lourenço Lúcio A. P., Steel fibers for the shear resistance of high strength concrete beams, *Seventh International RILEM Symp on Fiber Reinforced Concrete: Design and Applications*. Madras, Chennai India, September 2008.
- Swaddiwudhipong S., Constance Seow Puay, Modelling of steel fiber-reinforced concrete under multi-axial loads, *Eng Cement and Concrete Research* 36, pág. 1354–1361, 2006.
- Tokgoz Aerkan y Dundar Cengiz. Experimental study on steel tubular columns in-filled with plain and steel fiber reinforced concrete, *Thin Walled Structures*, doi:10.1016/j.tws.2010.01.009, 2010.
- Truesdell, C. and Toupin, R., The classical field theories. Ed. by S.Flugge - *Handbuch der Physik II/I - Springer Verlag - Berlin*, 1960.
- Wang Yung-Chih, Lee Ming-Gin, Ultra-high strength steel fiber reinforced concrete for strengthening of rc frames, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 15, No. 3, pp. 210-218., 2007.
- Wang Zhi-Liang, Liu Yong-Sheng, Shen R.F, Stress–strain relationship of steel fiber-reinforced concrete under dynamic compression, *Construction and Building Materials* 22, (2008) 811–819, 2008.