

Resistencia al corte de vigas de hormigón armado reparadas con hormigón reforzado con fibras de acero

Gonzalo Ruano¹; Facundo Isla²; Bibiana Luccioni³

Resumen

Muchos elementos estructurales de hormigón armado están solicitados predominantemente a esfuerzos de corte y eventualmente pueden sufrir daño o roturas que hagan necesaria la reparación de los mismos. Entre las distintas técnicas de reparación existentes, la utilización de hormigón reforzado con fibras de acero como material de reparación resulta atractiva por las características especiales que presenta este material. Existen numerosos trabajos experimentales y numéricos que muestran los beneficios de construir elementos nuevos con hormigón reforzado con fibras dando propuestas de pautas de diseño y otros que tratan el tema del refuerzo de estructuras de hormigón armado con este material. Prácticamente no se encuentran antecedentes referidos a la reparación de estructuras de hormigón armado con este material compuesto. A los efectos de evaluar la eficiencia de esta técnica de reparación, en este trabajo se presentan los resultados experimentales de dos vigas de hormigón armado idénticas ensayadas a corte hasta rotura, luego reparadas con hormigón reforzado con fibras, mediante encamisado en laterales y fondo y ensayadas nuevamente. Para asegurar la falla por corte de las vigas, las mismas se construyeron con elevada cuantía longitudinal, estribado mínimo y relación distancia carga-apoyo/altura útil menor que dos. En el trabajo se presentan, además, los resultados de la simulación numérica del proceso completo, es decir, los ensayos de las vigas de hormigón armado sin daño previo y de las vigas dañadas a corte y luego reparadas con hormigón reforzado con fibras. 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. La comparación de los resultados numéricos con los experimentales permite validar la herramienta numérica que resulta útil para el diseño de este tipo de reparación.

Palabras clave: Viga. Corte. Hormigón armado. Reparación. Hormigón reforzado con fibras.

¹ Ing. Civil, Inst. de Estructuras, Univ. Nacional de Tucumán, CIUNSA.

² Ing. Civil, Inst. de Estructuras, Univ. Nacional de Tucumán, CONICET.

³ Dra. Ing. Civil, Inst. de Estructuras, Univ. Nacional de Tucumán, CONICET. Av. Roca 1800, 4000 S. M. de Tucumán, Argentina, gonzalo.ruano@gmail.com,

El presente trabajo está basado en los artículos Ruano et al. (2010a) presentado en las XXXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural – San Juan – Argentina Septiembre/Octubre 2010 y Ruano et al. (2010b) presentado MECOM 2010, Noviembre 2010.

1 Introducción

Muchas construcciones de hormigón armado pueden requerir refuerzo y/o reparación por diversas causas, entre las que se encuentran el cambio de destino, diseño según normativas antiguas, cambio de filosofía de diseño, envejecimiento o deterioro de los materiales o daño de los elementos estructurales ante situaciones extremas (Adhikary and Mutsuyoshi 2006). Es posible encontrar numerosos trabajos que hacen referencia a la creciente actividad en la industria de la construcción relacionada con el refuerzo y/o reparación de estructuras (Farhat et al 2007; Wang and Lee 2007; Kim et al 2007). La justificación de estas actividades suele estar fundada en que el reemplazo total de la estructura puede no ser viable económicamente o en que el uso continuo imposibilita la puesta fuera de servicio para el reemplazo (Li et al 2000). Existen actualmente distintas técnicas de refuerzo estructural como refuerzo con láminas de acero, polímeros reforzados con fibras u hormigones normales o especiales que pueden también ser usadas en la reparación de estructuras dañadas.

La técnica de adhesión de capas finas de materiales cementicios o recubrimiento con morteros u hormigones está muy extendida y ha probado ser eficiente. Sin embargo, en algunas ocasiones, este tipo de reparaciones plantea peligrosos problemas de durabilidad. Los principales problemas son la fisuración y despegue de la interfaz después de un período de servicio. La durabilidad de las capas finas de hormigón de refuerzo resulta comprometida por la fisuración de la capa de reparación, seguida de su despegue de la estructura. Se ha probado que la incorporación de fibras metálicas en el hormigón o mortero mejora muchas de sus propiedades, principalmente su ductilidad. Los ensayos experimentales y la experiencia de obras muestran que el refuerzo de la capa de recubrimiento con fibras que proveen cierta continuidad a través de las fisuras demora el inicio y la propagación del despegue de las capas de refuerzo. Por otro lado, el hormigón reforzado con fibras (HRF) tiene la ventaja de que puede ser colocado en pequeños espesores mientras que una capa de hormigón con armadura convencional requeriría espesores bastante mayores (Nguyen, Toumi and Turatsinze 2010).

La aptitud del HRF como material de reparación está respaldada además por sus cualidades y propiedades mecánicas como ser mayor tenacidad que el hormigón convencional, patrón de fisuración extendido pero con fisuras de menor ancho (Altun, Haktanir and Ari 2007), cambio de modo de falla de frágil a dúctil (Lee 2006), aporte en la resistencia al corte (Juárez et al 2006; Ding, You and JAlali 2011), resistencia a cargas cíclicas y mantenimiento de integridad (Campione and 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 and Lee 2007). Otra ventaja de las fibras es que a diferencia de las armaduras convencionales, prácticamente no presentan riesgos de corrosión (Nguyen, Toumi and Turatsinze 2010).

Es escasa la bibliografía acerca de reparación de elementos dañados previamente con este tipo de material, sin embargo, se pueden encontrar trabajos que usan como recubrimiento otros materiales como compuestos de matriz polimérica con fibras (Hadi 2003). En el presente trabajo se estudia la reparación de vigas de hormigón armado solicitadas preponderantemente a esfuerzos de corte con HRF de acero y se presenta una herramienta para la reproducción numérica de las vigas reparadas con esta técnica.

2 Vigas ensayadas a corte

2.1 Geometría de las vigas

Se construyeron dos vigas de hormigón armado idénticas, Viga 1 y Viga 2, de 1600x250x150mm. Para lograr que estas fallen por corte y no por flexión se utilizó elevada cuantía longitudinal y estribado mínimo según norma CIRSOC 201 (2005). Junto con las vigas se moldearon distintos tipos de probetas para la caracterización del hormigón y el hormigón con fibras utilizados. Para la construcción de las vigas se usó un hormigón H-30 autocompactante y acero conformado ADN-420 nervurado. La armadura longitudinal estaba compuesta por tres barras ϕ 16mm con anclaje de gancho en ángulo recto en la parte inferior y dos barras rectas ϕ 8mm en la parte superior; como armadura transversal se usaron estribos ϕ 6mm de dos ramas cada 125mm. Ver Figura 1(a).

2.2 Apoyos, carga e instrumentación

Las vigas fueron ensayadas a flexión de tres puntos con 1200 mm de luz entre apoyos y relación $a/d=1.78$ como se ilustra en la Figura 1(b). Para los apoyos de la viga de hormigón armado se utilizaron dos rodillos de acero de 45 mm de diámetro con casquetes de acero inferior y superior de cara plana. La aplicación de la carga se realizó mediante una rótula de acero como se ilustra en la Figura 1(b). Durante los ensayos se registró la flecha del eje de la viga en el punto de aplicación de la carga mediante transductores potenciométricos de desplazamiento colocados en una cara lateral a la altura del eje de simetría de la viga. Paralelamente, se registraron los desplazamientos verticales y carga medidos mediante la celda de carga de la máquina.

En el caso de ambas vigas se realizó una primera etapa de carga con control de carga a velocidad de 0.167kN/s hasta alcanzar los 30kN; desde ese punto se continuó con control de desplazamiento a velocidad de 0.5mm/min. Las dos vigas fueron sometidas a un ciclo de desplazamiento superando la carga máxima y luego descargadas. Adicionalmente, la Viga 1 fue nuevamente cargada alcanzando desplazamientos superiores a los correspondientes a la carga pico y descargada.

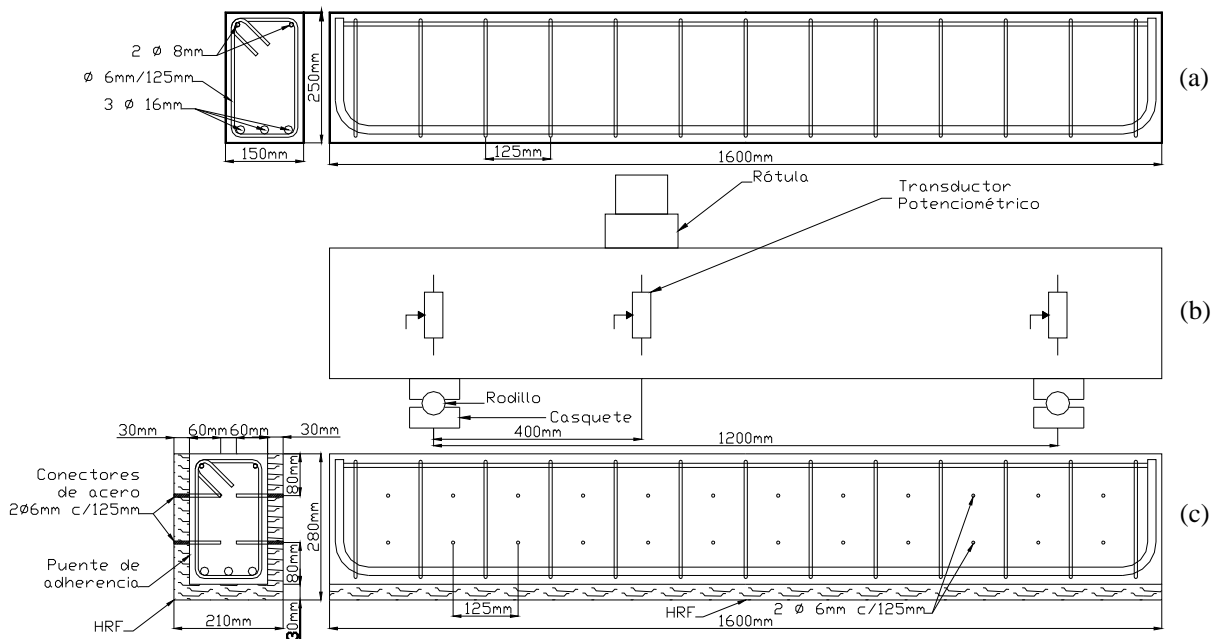


Figura1: (a) Detalle armadura. (b) Esquema de montaje e instrumentación. (c) Detalle Viga Reparada con HRF.

2.3 Caracterización del hormigón

Para la caracterización del hormigón se moldearon probetas cilíndricas de 100x200mm y vigas prismáticas de 150x150x600mm. Las probetas cilíndricas fueron ensayadas a compresión según los ensayos sugeridos en norma ASTM C 469 – 87a (1987), que permiten obtener el módulo de elasticidad y la respuesta completa a compresión. Las vigas fueron ensayadas a flexión siguiendo las recomendaciones de la norma EN 14651:2005:E (2005) con lo cual se obtiene la curva de respuesta de una viga sometida a fractura en Modo I y se puede caracterizar la respuesta en tracción que se usa en el análisis numérico. Los resultados obtenidos directamente de estos ensayos se muestran en Tabla 1 identificados con letra *cursiva* para distinguirlos de las restantes propiedades consignadas en la misma tabla que no pueden medirse directamente sino que corresponden a valores estimativos para este tipo de hormigón o se obtienen indirectamente a través de la calibración del modelo numérico para ajustar los resultados de los ensayos de caracterización del material según se describe en el punto 5.4.

Tabla 1: Propiedades Materiales Usados

Propiedades	Hormigón		Acero	Fibras
	Original	Reparación	Barras	Reparación
<i>Módulo de Elasticidad, E</i> [MPa]	28000	29500	200000	200000
Coeficiente de Poisson, ν	0.2	0.2	0.2	0.2
<i>Resist. última a tracción, σ_{ut}</i> [MPa]	-	-	-	1000.0
<i>Resist. última a compresión, σ_{uc}</i> [MPa]	33.0	37.0	-	1000.0
<i>Tensión umbral de fluencia en compresión, σ_{fc}</i> [MPa]	23	26	480.0	360
Relación de resistencias inicial (compresión/tracción), R^{Op}	9.5	17	1	1
Función de Fluencia	Lubliner-Oller	Lubliner-Oller	Von Mises	Von Mises
Curva de endurecimiento en tracción	Exponencial	Exponencial	Lineal Ht=10000	Lineal Ht=8000
Curva de endurecimiento en comp.	Exp. c/máximo	Exp. c/máximo	Lineal Ht=10000	Lineal Ht=8000
Energía. de fractura, G_f^P [MPa.mm]	0.032	0.026	-	-
Energía. de aplastamiento, g_c^P [MPa]	132	142	-	-
Criterio de Potencial	Lubliner-Oller	Lubliner-Oller	Von Mises	Von Mises

3 Reparación

La reparación de las vigas se realizó mediante un encamisado de 3cm de espesor en los laterales y fondo de la viga, utilizando para ello un hormigón autocompactante de características similares al original pero reforzado con fibras de acero. Ver Figura 1(c).

Al tratarse de vigas sometidas predominantemente a corte, se confió en los refuerzos laterales de las vigas la restitución de la capacidad portante mientras que el refuerzo del fondo de las vigas servía para dar continuidad a los refuerzos laterales y como recubrimiento, pues las vigas ensayadas tenían fisuras en las caras laterales que se continuaban en el fondo.

Para evitar la falla de la interfaz de los materiales de distinta edad, se utilizaron, en ambas caras laterales, conectores de acero anclados mediante un producto químico y además un puente de adherencia en la superficie. No se colocaron conectores vinculando el fondo de las vigas con la capa inferior de HRF de refuerzo.

3.1 Preparación de la superficie

Como primera medida, se quitó manualmente el hormigón suelto con ayuda de martillo y cincel. Posteriormente se perforaron los orificios para los conectores metálicos. Estos orificios de diámetro 8mm y 60mm de profundidad fueron realizados en dos alturas correspondientes a una distancia de 80mm tanto de la cara inferior como de la superior y cada 125mm en horizontal. Luego la superficie fue soplada con aire a presión para eliminar el polvo presente en las fisuras, orificios y las caras. Seguidamente, se utilizó un cepillo de acero manual y luego se utilizó agua a presión para lograr que la superficie quede libre de material suelto y polvo. Finalmente, se secó la superficie con aire a presión. Se logró, de esta forma, una superficie libre de material suelto y con cierta rugosidad.

3.2 Colocación conectores metálicos y puente de adherencia

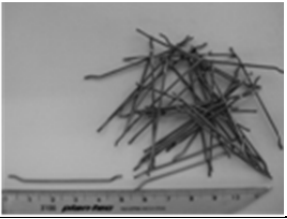
Para anclar los conectores metálicos, que eran barras de acero nervurado de 6mm de diámetro y 90mm de longitud, se utilizó un producto comercial a base de resina de poliéster en éster de metacrilato. Los conectores estaban insertos y anclados 60mm en el cuerpo de la viga y sobresalían 30mm (Figura 1(c)).

Como puente de adherencia entre el HRF de refuerzo y el hormigón de la viga original se utilizó un producto comercial a base de resinas epoxídicas modificadas que se aplicó con pincel en el momento previo al colado del hormigón de refuerzo.

3.3 Hormigón reforzado con fibras

Para la capa de reparación se utilizó un hormigón autocompactante de características similares al usado en la viga original pero con adición de fibras metálicas. Se utilizaron fibras de acero de 1.0mm de diámetro y 50 mm de longitud con ganchos en los extremos, en una proporción de 40 kg fibra/m³ de hormigón lo cual equivale a una proporción de 0.5% en volumen. Las propiedades de las fibras utilizadas se muestran en Tabla 2.

Tabla 2: Propiedades de las Fibras

Largo (L)	50mm	
Diámetro (d)	1.0mm	
Relación L/d	50	
Extremos	Ganchos	
Resistencia a Tracción (σ_{ut})	1000MPa	
Módulo de Elasticidad (E)	200000MPa	

Para la caracterización del HRF utilizado en la reparación se moldearon probetas cilíndricas de 100x200mm y vigas prismáticas de 150x150x600mm que luego se ensayaron a compresión uniaxial y flexión respectivamente, obteniéndose las propiedades presentadas en Tabla 1.

Tratándose de una experiencia piloto, el colado del hormigón de reparación se realizó colocando la cara inferior de las vigas hacia arriba para asegurar el llenado y una superficie de apoyo plana. Se observa, sin embargo, que en la práctica es necesario aprovechar las características de autocompactabilidad del hormigón ya que el colado de las capas de refuerzo debe hacerse en la posición original de los elementos a reparar.

Adicionalmente, se llenó una placa vertical con conectores del mismo espesor del refuerzo que luego fue cortada para evaluar la distribución y orientación de las fibras de acero, observándose preferencia de las fibras a adoptar posición horizontal.

3.4 Ensayo de las vigas reparadas

Las vigas reparadas fueron reensayadas a los 28 días de realizado el refuerzo, respetando la misma configuración de apoyos y carga. La historia de carga consistió en una carga inicial creciente a velocidad de 0.167kN/s hasta alcanzar los 30kN. A partir de allí, se continuó con control de desplazamiento a velocidad de 0.5mm/min por los próximos 20mm.

4 Resultados experimentales

4.1 Vigas originales

En la Figura 2 se muestran las curvas carga-desplazamiento del punto de aplicación de la carga obtenidas para las dos vigas originales (sin refuerzo). Las vigas alcanzaron cargas máximas de 267kN y 274 kN en el caso de la Viga 1 y Viga 2 respectivamente. Mostraron 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 casquete 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. Los ensayos fueron estables, sin roturas bruscas, hasta rotura total. La carga cayó hasta 144kN para la Viga 1 en su segundo ciclo y 201kN para la Viga2.

En las Figuras 3 y 4 se ilustra el estado final de las Vigas 1 y 2 respectivamente. Se advierte que en la Viga 1 se quitó manualmente el recubrimiento sin dificultad, tarea no realizada en la Viga 2.

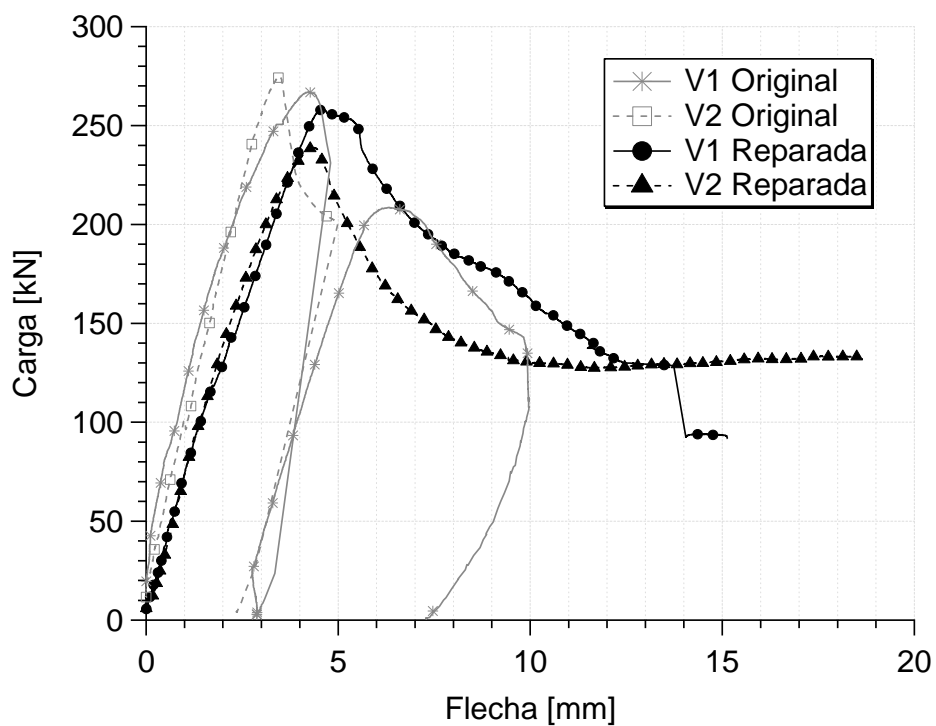


Figura 2: Carga-Desplazamiento Vigas Originales y Reparadas



Figura 3: Estado final de la Viga 1.



Figura 4: Estado final de la Viga 2.

4.2 Vigas reparadas

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

llegando la Viga 1 a 258kN (97% de la capacidad portante original) y la Viga 2 a 239kN (87% de la capacidad portante original).

En las vigas reparadas se observó también formación de fisuras diagonales entre el punto de aplicación de la carga y el borde del casquete de 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. Contrariamente a lo sucedido en las vigas originales, al terminar los ensayos, no resultó sencillo retirar el hormigón del refuerzo. En los ensayos de las vigas reparadas se llegó a flechas mayores que en los originales, ver Figura 2. La Viga 1 en su respuesta presentó un escalón en el que cae la carga que fue coincidente con el estallido del recubrimiento de la armadura superior.

Las Figuras 5 y 6 muestran el estado final de las vigas reparadas ensayadas.

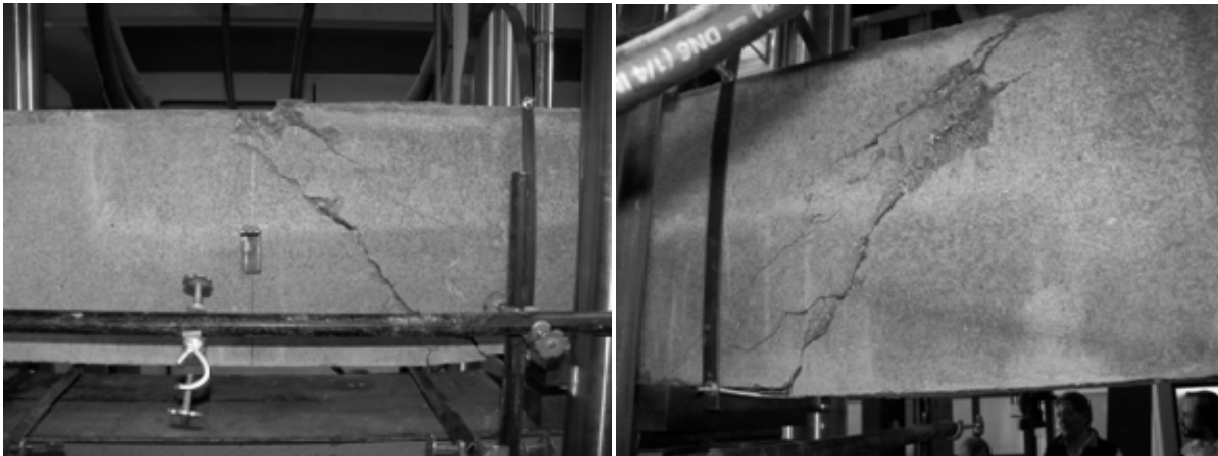


Figura 5: Estado final de la Viga 1 reparada y reensayada a rotura, Frente y Posterior.



Figura 6: Estado final de la Viga 2 reparada y reensayada a rotura, Frente y Posterior.

5 Análisis numérico

5.1 Introducción

Para la simulación numérica de los ensayos realizados se utiliza un programa de Elementos Finitos (EF) planos desarrollado dentro del grupo de investigación que permite realizar análisis estático y dinámico no lineal de estructuras formadas por distintos tipos de materiales simples y compuestos.

5.2 Modelos Utilizados para los materiales

Para modelar las vigas ensayadas mediante el método de EF sin necesidad de discretizar explícitamente las armaduras y las capas de reparación se utilizan los modelos de materiales simples y compuestos que se describen a continuación.

5.2.1 Modelo para materiales compuestos

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. El hormigón armado también puede ser considerado como un material compuesto constituido por una matriz de hormigón y un refuerzo de fibras longitudinales.

A su vez, si se quiere modelar la viga con las capas de reparación mediante un programa de EF planos también se debe considerar al conjunto como un material compuesto por el hormigón simple o armado y el hormigón con fibras.

La forma más simple de modelar el comportamiento de materiales compuestos es la teoría de mezclas. En este trabajo se utiliza una generalización de la teoría de mezclas de materiales ortótropos para obtener el comportamiento del hormigón con fibras, del hormigón armado y del hormigón reparado con hormigón con fibras.

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 (Truesdell and Toupin 1960):

- 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).

5.2.2 Modelo de hormigón

Para el hormigón se utiliza el modelo de daño plástico modificado (Luccioni and Rougier, 2006), (Luccioni and Rougier, 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 (Lubliner et al., 1989; Luccioni, Oller and Danesi, 1996)

La adopción de una función de fluencia de segundo grado en las componentes del tensor de tensiones (Luccioni and Rougier, 2006), 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.

La variable de endurecimiento plástico usada 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 (Oller et al., 1988). La regla de evolución de la variable de endurecimiento plástico tiene en cuenta el comportamiento diferenciado en tracción y compresión (Luccioni, Oller and Danesi, 1996) y permite simular adecuadamente la disipación de energía en compresión triaxial del hormigón (Luccioni and Rougier 2006).

5.2.3 Modelo constitutivo utilizado para la armadura

Para modelar el hormigón armado se considera al mismo como un material compuesto por hormigón y armaduras con una proporción dependiente de la cuantía de armadura. Para las armaduras se utiliza como modelo elastoplástico clásico con endurecimiento lineal, criterio de fluencia de Von Mises y flujo asociado.

5.2.4 Modelo constitutivo utilizado para las fibras

Se considera como aproximación que el HRF está compuesto por una matriz de hormigón y fibras dispuestas en tres direcciones ortogonales, cuyas proporciones se estiman a partir de cortes de la placa hormigonada a tal fin.

Las fibras de acero insertas en el hormigón contribuyen predominantemente en la dirección axial de las mismas. Para tener en cuenta este aspecto, se utiliza para las fibras de acero un modelo elastoplástico para materiales ortótropos. El modelo parte de la hipótesis de que existen dos espacios (Betten, 1988; Luccioni, Oller and Danesi 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 desarrollados para materiales isótropos.

Por otro lado, 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) (Ver Tabla 2). Debido a estos fenómenos, la condición de compatibilidad expresada en la sección (5.2.1 iv) 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 (Car 2000, Luccioni and López 2002, Luccioni and López 2005). Teniendo en cuenta que en este caso las fibras se deslizan antes de entrar en fluencia, se modifica el modelo elastoplástico ortótropo antes descrito para las barras de 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 calibrar aproximadamente con una recta (ISLA CALDERÓN and LUCCIONI, 2008).

5.3 Propiedades mecánicas de los materiales utilizados

Para la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales utilizados se realizaron ensayos en probetas. Muchas de las propiedades de los materiales utilizadas en la simulación numérica fueron obtenidas de manera indirecta mediante la calibración de los modelos con estos resultados experimentales.

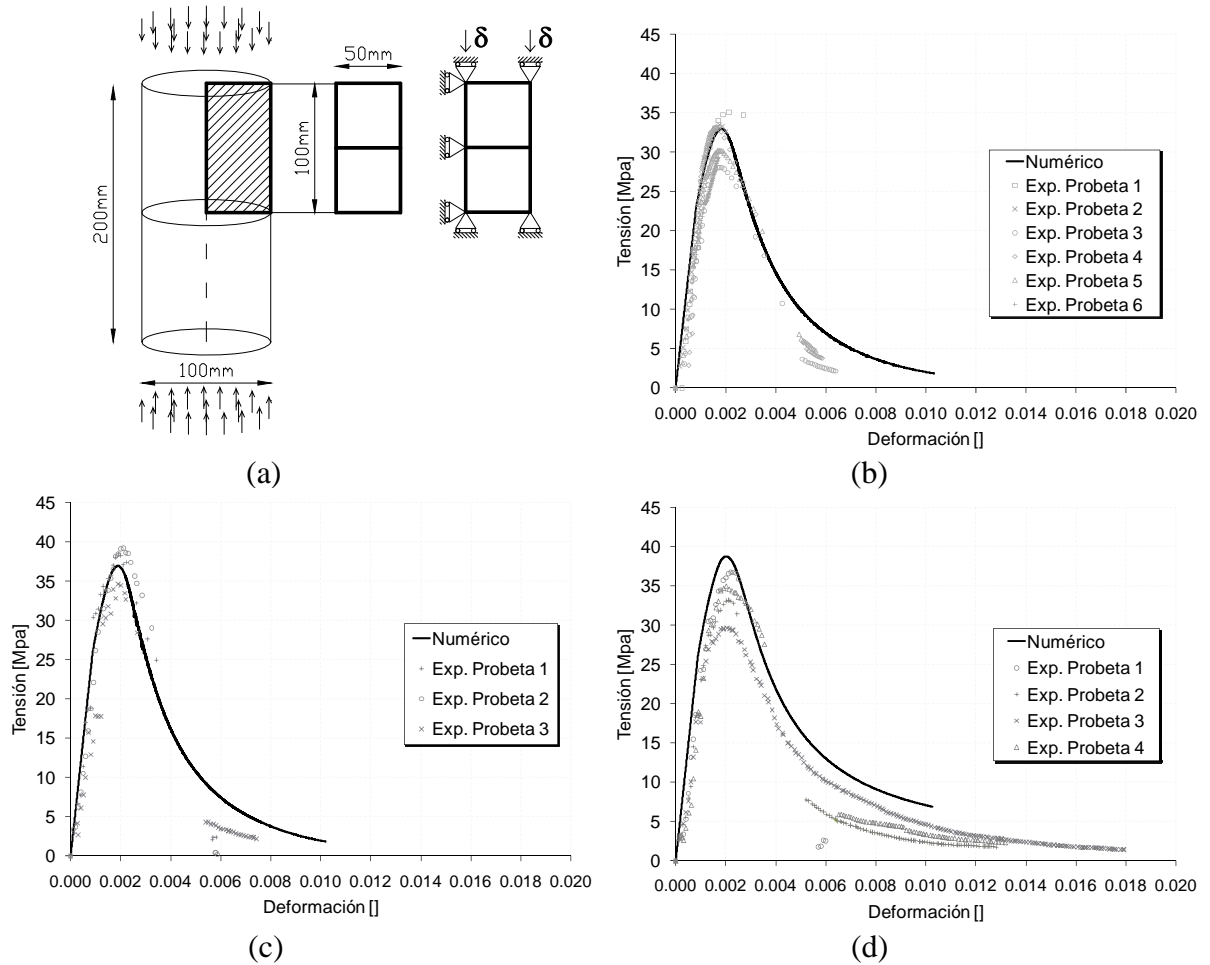


Figura 7: Ensayos de compresión de probetas de hormigón (a) Malla EF Compresión. (b) Curvas tensión deformación en compresión uniaxial del hormigón simple viga original; (c) Curvas tensión deformación en compresión uniaxial del hormigón autocompactante simple de reparación; (d) Curvas tensión deformación en compresión uniaxial del hormigón autocompactante con fibras utilizado en la reparación.

En la Figura 7(a) se muestra la malla de EF usada para la simulación numérica del ensayo de compresión uniaxial del hormigón. En las Figuras 7 (b), (c) y (d) se muestran las curvas tensión deformación axial obtenidas experimental y numéricamente por calibración para los distintos hormigones y hormigón con fibras utilizados.

En Figura 7(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. Sin embargo, en la práctica al incorporar fibras al hormigón es común que, por problemas de compactación, la resistencia a compresión uniaxial del HRF resulte 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 8 (a) se muestra un esquema del ensayo a flexión y en Figura 8(b) la malla de EF usada para la calibración de propiedades a flexión de los distintos hormigones utilizados. En las Figuras 8 (c) y (d) se muestran las curvas experimentales promedio carga-apertura de fisura obtenidas para los tres tipos de hormigón y la comparación con los resultados numéricos. Se evidencia el aumento de ductilidad debido a la adición de las fibras que evitan la caída brusca de la carga una vez alcanzada la resistencia máxima. En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros calibrados a partir de estos ensayos.

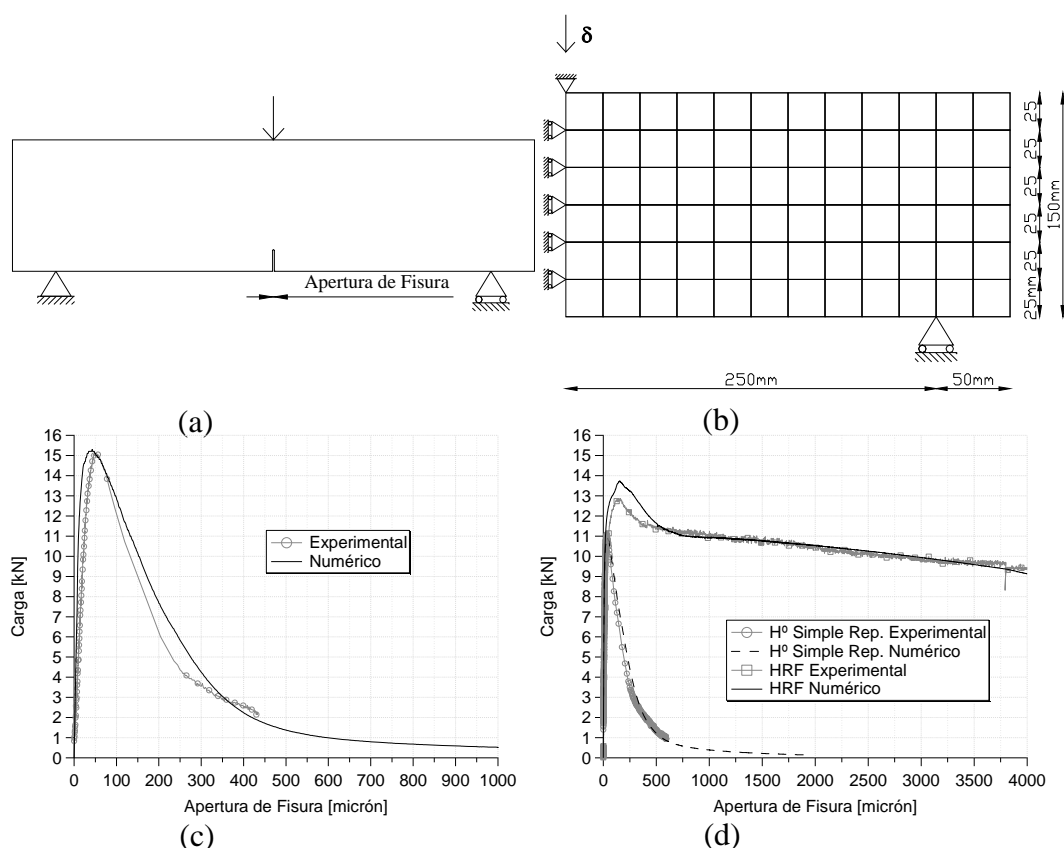
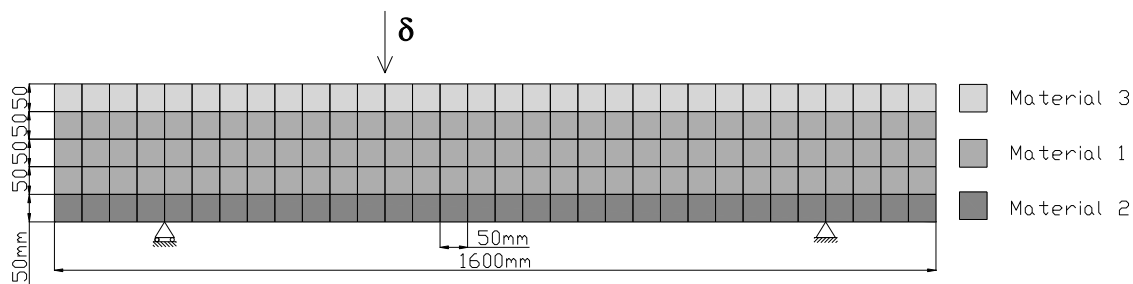


Figura 8: Ensayos de flexión. (a) Esquema Ensayo. (b) Malla EF. (c) Curvas carga-apertura de fisura (hormigón viga original). (d) Curvas carga-apertura de fisura (hormigón simple y HRF utilizados en la reparación)

5.4 Simulación de las vigas de hormigón armado ensayadas

Para modelar los ensayos de las vigas se optó por realizar un proceso evolutivo compuesto por dos casos de carga en los que se utiliza la misma malla de EF y lo que cambia es el espesor, pues aumenta al reparar las vigas. En la Figura 9 se muestra la malla de EF utilizada 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. 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 a flexión.

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. Para evitar que esto afecte la respuesta, 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 para poder comparar con los resultados experimentales. 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 desplazamientos, el eje de la viga reparada.



Figura

9: Malla de EF y Condiciones de Borde usada en Simulación Numérica.

6 Comparación de resultados numéricos y experimentales

6.1 Vigas originales

La Figura 10 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. Esto muestra que el modelo de hormigón utilizado que ha sido probado con buenos resultados en tracción y compresión (Luccioni and Rougier 2005) debe ser aún calibrado para el caso de corte.

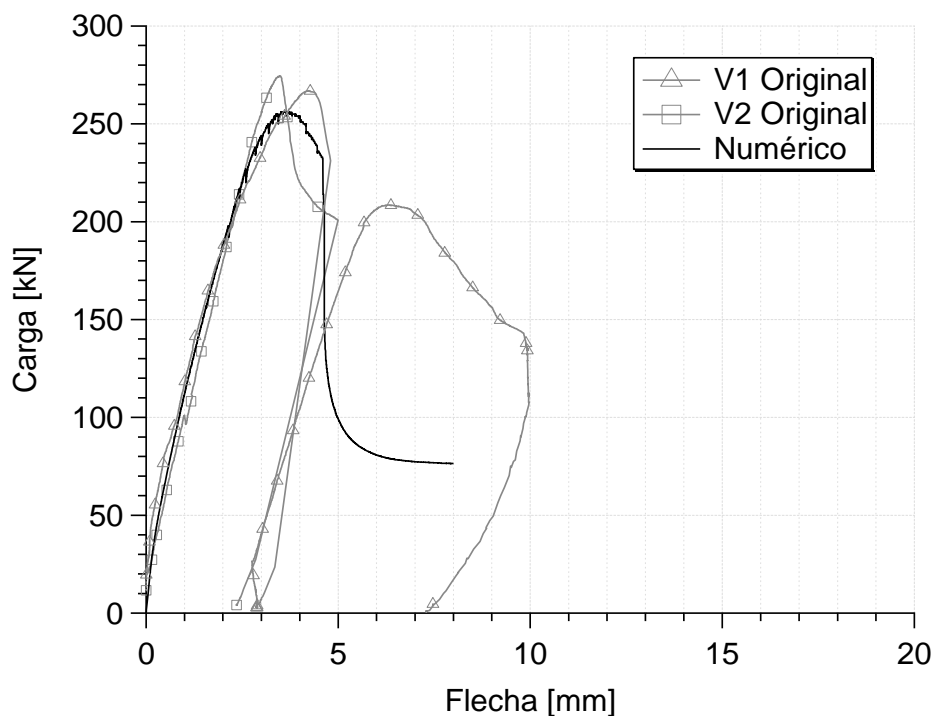


Figura 10: Curvas carga-flecha de vigas originales. Comparación de resultados numéricos y experimentales.

6.2 Vigas reparadas

En Figura 11 se presenta la comparación de las curvas carga-flecha obtenidas 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, Oller and Danesi 1996, Luccioni and Rougier, 2005). La degradación global promedio de las vigas originales puede obtenerse aproximadamente de la pendiente de la última rama de descarga de la Fig.10. Allí se observa que la viga dañada presenta una rigidez 50% menor que la original. Si se tiene en cuenta esta degradación de rigidez de la parte central de la viga reparada, se obtiene la curva de línea de trazos de la Figura 11 que se aproxima bastante más a los resultados experimentales.

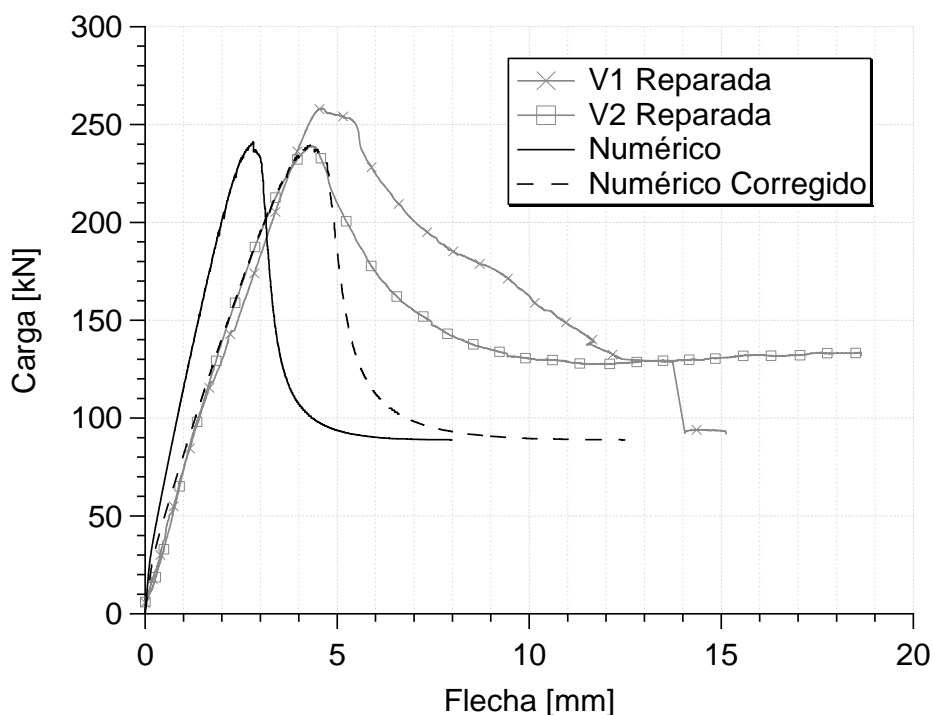


Figura 11: Curvas carga-flecha de vigas reparadas. Comparación de resultados numéricos y experimentales.

7 Conclusiones

En este trabajo se estudia la eficiencia frente al corte de la técnica de reparación de vigas de hormigón armado con un encamisado de pequeño espesor de HRF de acero.

Las pruebas realizadas muestran el uso de HRF autocompactante es de potencial aplicación en tareas donde se ha de colar material en espesores reducidos y lugares de difícil acceso. Esto sumado a la compatibilidad del HRF con el hormigón armado y a sus buenas propiedades estructurales y de durabilidad permite concluir que esta técnica de reparación representa una alternativa muy conveniente.

La reparación con un HRF de características similares al hormigón original muestra buena restitución de la capacidad portante y permite preservar la integridad de las vigas reparadas ensayadas a rotura. Es de esperar que si se usan hormigones de mayor resistencia se logre superar la capacidad portante original. Sin embargo debe notarse que los ensayos presentados corresponden a ensayos piloto y para confirmar y extender las conclusiones es menester realizar una serie mayor de ensayos experimentales.

Adicionalmente se presenta la aplicación de un modelo simple de materiales compuestos, basado en la teoría de mezclas, a la simulación del comportamiento de vigas sometidas a dos ciclos de carga, el primero correspondiente a la estructura original y el segundo a la estructura reparada 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 esquema de simulación utilizado es posible representar objetivamente el comportamiento del hormigón original durante el segundo ensayo ya que se preservan los cambios internos experimentados por el material durante el primer ensayo.

La aproximación numérica brinda estimaciones acertadas de la carga máxima obtenida experimentalmente siendo una buena herramienta numérica para la predicción del comportamiento de elementos reparados. Sin embargo para poder reproducir la curva carga-desplazamiento (rigidez, curva post-pico, resistencia residual) es necesario calibrar mejor el modelo de hormigón en corte, incluir la degradación de rigidez y el deslizamiento de las armaduras.

8 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), a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica y al Consejo Nacional de Investigaciones Científico Técnicas (CONICET) de Argentina por el apoyo económico recibido y a Maccaferri de Argentina S.A. que provee las fibras para los ensayos.

9 Referencias

- ADHIKARY and MUTSUYOSHI (2006). Shear strengthening of reinforced concrete beams using various techniques. *Construction and Building Materials*, 20, p. 366-373.
- ALTUN FATIH, HAKTANIR TEFARUK and ARI KAMURA (2007). Effects of steel fiber addition on mechanical properties of concrete and RC beams. *Construction and Building Materials*, 21, p. 654-661.
- AMERICAN SOCIETY OF TESTING AND MATERIALS (1987). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. ASTM C 469-87a. Philadelphia.
- BETTEN, J. (1988). Application of tensor functions to the formulation of yield criteria for anisotropic materials. *International Journal of Plasticity*, 4, p. 29-46, 1988.
- CAMPIONE G. and MANGIAVILLANO M. L. Fibrous reinforced concrete beams in flexure: Experimental investigation, analytical modeling and design considerations. *Engineering Structures*, 30, p. 2970–2980.
- CAR, E. (2000). Modelo Constitutivo Continuo para el Estudio del Comportamiento Mecánico de los Materiales Compuestos. Ph. D. Dpto. de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería, UPC, España.
- CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LOS REGLAMENTOS DE SEGURIDAD DE OBRAS CIVILES. *Reglamento Argentino para Estructuras de Hormigón*. CIRSOC 201 (2005).
- CHANVILLARD, G. (1999). Modeling the pullout of wire-drawn steel fibers. *Cement and Concrete Research*, 29, p. 1027–1037, 1999.
- DING, Y., YOU, Z. and JALALI, S. The composite effect of steel fibres and stirrups on the shear behaviour of beams using self-consolidating concrete. *Engineering Structures*, 33, p. 107-117.
- EUROPEAN STANDARD (2005). *Test method for metallic fibered concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)*. EN 14651:2005:E. CEN 2005.
- FARHAT F. A., NICOLAIDES D., KANELLOPOULOS A. and KARIHALOO B.L. High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC) – Performance and application to retrofitting. *Engineering Fracture Mechanics*, 74, p. 151–167.
- HADI, M.N.S (2006). Retrofitting of shear failed reinforced concrete beams. *Composite Structures*, 62, p. 1-6.
- ISLA CALDERÓN F. AND LUCCIONI B. (2008). *Modelo para hormigones reforzados con fibras*. ENIEF 2008 San Luis Argentina.
- 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.

- KIM JANG-HO JAY, LIM YUN MOOK, WON JONG-PIL, PARK HAE-GEUN AND LEE KYONG-MIN (2007). Shear capacity and failure behavior of DFRCC repaired RC beams at tensile region. *Engineering Structures*, 29, p. 121–131.
- LEE HYUN-HO (2006). Shear strength and behavior of steel fiber reinforced concrete columns under seismic loading. doi:10.1016/j.engstruct.2006.08.016.
- LI V. C., HORII H., KABELE P., KANDA T. and LIM, Y.M. (2000). Repair and retrofit with engineered cementitious composites. *Engineering Fracture Mechanics*, 65, p. 317-334.
- LLOPIZ, C. R. (2008). *Hormigón I Unidad 6: Análisis y Diseño al Corte*. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza Argentina.
- LUBLINER, J., OLIVER, J., OLLER S. and OÑATE E. (1989). A plastic damage model for concrete. *Int. J. Solids Struct.*, 25(3), p. 299-326, 1989.
- LUCCIONI, B. and LÓPEZ, D. (2002). Modelo para Materiales Compuestos con deslizamiento de Fibras Cap.13 411-431. *Análisis y Cálculo de Estructuras de Materiales Compuestos*. Ed. S. Oller, CIME, España.
- LUCCIONI, B. and LÓPEZ, D. (2005). Bond-slip in reinforced concrete elements. *Journal of Structural Engineering*, ST/2002/023537.
- LUCCIONI, B. and ROUGIER, V. (2005). A plastic damage approach for confined concrete. *Computer & Structures*, 83, 2238-2256, 2005.
- LUCCIONI, B. M. and ROUGIER V. C (2007). Numerical assessment of frp retrofitting systems for reinforced concrete elements, *Engineering Structures*, 29, p. 1664-1675, 2007.
- LUCCIONI, B., OLLER, S. and DANESI, R. (1995). Plastic Damaged Model for Anisotropic Materials. *Applied Mechanics in the Americas*, I, p. 124-129, 1995.
- _____ (1996). Coupled plastic damage model. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 129:81-9.
- NAAMAN, A. (2003). Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology Japan Concrete Institut*, v. 1, n. 3, p. 241-252.
- NGUYEN, T-H., TOUMI, A. and TURATSINZE, A. (2010). Mechanical properties of steel fibre reinforced and rubberised cement-based mortars. *Materials & Design Vol. 31 Issue1, January 2010*, p. 641-647.
- OLLER S., OLIVER J., LUBLINER J. and OÑATE, E. (1988). Un modelo constitutivo de daño plástico para materiales friccionales. Parte I: variables fundamentales, funciones de fluencia y potencial. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para el Cálculo y Diseño en Ingeniería* 1988;4, p. 397-428.
- RUANO, G., ISLA, F., SFER, D. and Luccioni B. (2010a). Vigas de hormigón armado reparadas con hormigón reforzado con fibras de acero ensayadas a corte. XXXIV Jornadas Sul-Americanas de Engenharia Estrutural, San Juan, Argentina, 27 septiembre a 01 de outubro de 2010.
- RUANO, G., ISLA, F., GIACCIO, G. and LUCCIONI, B. (2010b). Simulación numérica del comportamiento de vigas reparadas con hormigón reforzado con fibras. *Mecánica Computacional Vol XXIX*, p. 10155-10171, 15-18 Noviembre 2010 Buenos Aires Argentina.
- TRUESDELL, C. and TOUPIN, R. (1960). The classical field theories. Ed. by S.Flugge, *Handbuch der Physik II/I*, Springer Verlag, Berlin 1960.
- WANG YUNG-CHIH AND LEE MING-GIN (2007). Ultra-high strength steel fiber reinforced concrete for strengthening of rc frames. *Journal of Marine Science and Technology*, v. 15, n. 3, p. 210-218.

Shear strength of reinforced concrete beams repaired with fiber reinforced concrete

Abstract

Many reinforced concrete structural elements are subjected mainly to shear efforts and may eventually suffer damage or breakage with the consequent need of repair. Among the different available repairing techniques, the use of steel fiber reinforced concrete is an attractive one because of the material special properties. Experimental and numerical papers show the benefits of building new structural elements with fiber reinforced concrete and design guidelines are proposed for this purpose. Other papers deal with reinforcement using this material but there is not much information related to the repairing of damaged elements with this new material. This paper presents the experimental results of two reinforced concrete beams damaged under shear, then repaired with steel fiber reinforced concrete jacket on both sides and at the bottom of the beam and tested again to prove the efficiency of this retrofitting technique. The two beams are identical and have high longitudinal geometrical ratio, minimum stirrup quantity and span to depth ratio less than two that ensure shear failure. The numerical simulation of the complete process, that is, the original beams and the beams repaired with steel fiber reinforced concrete is also presented in this paper. For this purpose a non linear finite element program is modified incorporating an algorithm that simulates the reparation process that involves changes in geometry and materials. The contrast of numerical results against experimental results allows the validation of the numerical tool that can be useful for the design of this type of reparation.

Keywords: Beam. Shear. Reinforced concrete. Repair. Fiber reinforced concrete.

1 Tests

Two identical reinforced concrete beams of 1600x250x150mm were built with the premise that they fail under shear and not in flexion. To achieve this, high longitudinal steel ratio and minimum stirrups were used. Cylindrical specimens of $\phi 100 \times 200$ mm and prismatic beams 150x150x600mm were also casted for the characterization of concrete and Fiber Reinforced Concrete (FRC). The concrete used was self-compacting H-30, and the steel was AND-420. The beams were tested in three point asymmetric flexure having 1200mm span and a/d ratio eq. 1.78 (Fig. 1(a)). The beams were tested under displacement control and the vertical displacement in the load application point was measured during the tests.

The repair was done with a 3cm self-compacting FRC jacket on both sides and at the bottom of the beams using a concrete strength similar to the original concrete (Fig. 1(c)). The fiber content used was 40kg/m³. 50mm long, 1.0mm diameter steel hooked-end fibers (Tab. 2). Anchorage steel connectors and a bonding agent were used to ensure bond between the different age materials.

The original beams reached peak loads of 267kN and 274kN (Fig. 2) and during the test, diagonal cracks occurred between the load application point and the support (Figs. 3 and 4) on the side with lower a/d ratio. Fig. 2 also shows load-displacement curves for the repaired beams. Also the stiffness of the repaired beams is lower than that of the original ones while the bearing capacity was highly restored. Diagonal cracking is also observed in the repaired beams, but the fibers bridging the cracks are evident in this case.

2 Numerical approach

FRC can be considered as a composite material formed by a concrete matrix and short spread fibers having each fiber a different orientation. Mixture theory is a simple way to model composites behavior. This paper uses a generalization of the orthotropic mixture theory to obtain the FRC behavior taking into account what happens in concrete and in fibers. The material anisotropy and the possible fiber slip are considered in a simplified way. A modified plastic damage approach (Luccioni and Rougier, 2006), (Luccioni and Rougier, 2007) is used for concrete. The classic mixture theory works well when long fibers are used, but with short fibers (as in the present case) the strain and stress field are modified because of the discontinuity and the hooked ends. An approximate way to simulate FRC behavior using mixture theory is through a modification of the fibers constitutive equations (Isla Calderón y Luccioni, 2008), taking into account that, in this case, the fibers slips before yielding. So the yield stress for axial direction of fibers is reduced and the hardening process, which depends on the pull-out process, is approximated by a linear hardening.

Figs. 7 and 8 show the Finite Element (FE) mesh used for the characterization material properties and the comparison of experimental and numerical results for uniaxial compression tests and flexural tests. A good correlation is achieved and the parameters measured experimentally (in *italic* format) and those numerically calibrated are shown in Table. 1.

An evolutionary process with two load cases, the first corresponding to the original beams and the second corresponding to the repaired ones is used for the simulation of the tests. In both cases the same mesh was used (Fig. 9) but the thickness of the specimens changed because of the reparation.

Fig. 10 shows comparison of experimental and numerical results for the original beams. The model accurately reproduces the elastic behavior and the peak load, but not so well the post-peak behavior. Fig. 11 shows the corresponding comparison for the repaired beams. It can be seen that the peak load prediction is correct, but the load-displacement curve is not.

3 Conclusions

The repairing technique of reinforced concrete beams damaged under shear using a thin steel FRC jacket is studied in this work. This repairing technique is a viable choice because FRC is compatible with reinforced concrete and provides structural and durability properties. Also the self-consolidating FRC use is of potential application in works where the material must be cast in thin or difficult access places.

The reparation with FRC, that has similar characteristics to the original concrete, showed good restitution of the bearing capacity and the repaired beams tested to failure showed integrity. It should be noted that the tested and repaired beams are part of pilot tests so a bigger experimental series must be tested to confirm and extend these conclusions.

Additionally, the application of a simple compost material model, based on mixture theory, to the simulation of beams subject to two load cycles, the first corresponding to the original structure and the second to de FRC repaired structure, is presented.

The way that the fiber contribution in FRC is modeled is simple and allows the reproduction of the characterizations tests with reasonable precision. The behavior of the original concrete in the second test can be reproduced because the internal changes suffered by the material in the first test are preserved. The numerical approximation gives good estimation of de peak load obtained in the tests, being a high-quality numerical tool for predicting the behavior of repaired structures. However, further development of the model, including shear calibration, stiffness degradation and reinforcement slipping is necessary in order to reproduce the load-displacement curve (stiffness, post-peak curve, residual strength).