

# Estudio Experimental de Vigas de Hormigón Armado Afectadas por Corrosión y Reparadas con Materiales de Matriz Polimérica Reforzados con Fibras (PRFs)

M. I. Schierloh <sup>1,a</sup>, V.C. Rougier <sup>1</sup>, R.F. Souchetti <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Concepción del Uruguay, E3264BTD, Entre Ríos, Argentina

<sup>a</sup>schierlm@frcu.utn.edu.ar

**Palabras Claves:** corrosión, reparación, polímeros reforzados con fibras, hormigón armado.

## Resumen

El deterioro de las estructuras de hormigón armado es, en la actualidad, uno de los mayores problemas de la industria de la construcción. Particular atención reviste la corrosión de las armaduras de acero que afecta tanto al acero como al hormigón, pues reduce la resistencia del primero y afecta la integridad del segundo. La demolición y el reemplazo de dichas estructuras implicaría un gran costo monetario y de tiempo, razón por la cual se presenta como alternativa viable para mejorar la capacidad de carga y extender la vida de servicio el refuerzo y/o reparación. En este sentido, el uso de materiales de matriz polimérica reforzados con fibras (PRFs) se ha convertido en un método efectivo, aplicable tanto a columnas, vigas y losas de hormigón armado.

En este trabajo se presenta un estudio experimental donde se evalúa la viabilidad del uso de PRFs para rehabilitar vigas de hormigón armado dañadas por corrosión. Las vigas fueron reforzadas y/o reparadas externamente con PRFs y sometidas a un proceso acelerado de corrosión de sus armaduras traccionadas. Finalmente los especímenes fueron ensayados a flexión hasta rotura. Para evaluar la actividad del proceso corrosivo se utilizaron técnicas no destructivas y destructivas. Estas últimas comprendieron la determinación de la pérdida de masa de la armadura principal. Los resultados de los ensayos revelaron que el uso de PRFs para el refuerzo externo de vigas de hormigón armado afectadas por corrosión de sus armaduras de acero es una técnica eficaz, capaz de mantener la integridad estructural y mejorar su comportamiento.

## Introducción

Un criterio racional de diseño de estructuras de hormigón armado plantea que las mismas deben ser capaces de resistir las condiciones ambientales previstas, conservando su seguridad, estabilidad y aptitud en servicio durante un período de tiempo preestablecido en la etapa de diseño. El modelo de deterioro del acero en el hormigón propuesto por Tuutti es una herramienta ampliamente aceptada para asegurar una determinada vida útil. La Fig.1 muestra la performance de una estructura de hormigón armado con relación a la corrosión de armaduras y los eventos relacionados. En general los puntos 1 y 2 representan eventos relacionados con los estados de servicio de la estructura, el punto 3 se relaciona tanto con los estados de servicio como con los límites y el 4 representa el colapso de la estructura [1].

Observando el diagrama de Tuutti [1] un elemento de hormigón armado, situado entre los puntos 2 y 3, si se elige un método adecuado de reparación podría ser llevado a la etapa comprendida entre los puntos 1 y 2. Es decir es factible pensar en la rehabilitación y recuperación de su capacidad resistente inicial.

Los métodos tradicionales para la reparación ó rehabilitación de vigas de hormigón armado con sus armaduras dañadas por corrosión, incluyen la remoción del recubrimiento de hormigón y aplicación de uno nuevo y/o la colocación de planchuelas de acero. Estas últimas tienen problemas de durabilidad pues son vulnerables a los procesos corrosivos y por lo general se necesitan equipos pesados para instalarlas. En consecuencia se hace sumamente necesario estudiar nuevos materiales y técnicas que permitan reforzar en forma efectiva estructuras deterioradas.

Investigaciones recientes realizadas en el campo de los PRFs han demostrado que el uso de dichos materiales para la rehabilitación de vigas dañadas por corrosión ha sido exitoso. Sin embargo pocos trabajos han estudiado el comportamiento post reparación de elementos con sus armaduras de acero afectadas por distintos grados de corrosión y reparados con PRF, en lo que respecta a la recuperación de la resistencia inicial y la evolución del proceso de corrosión.

El objetivo del presente trabajo, el cual forma parte de un programa numérico-experimental que se está desarrollando en la Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional, es evaluar el comportamiento estructural post reparación y la actividad corrosiva de vigas de hormigón armado dañadas por corrosión, reparadas con materiales de matriz polimérica reforzados con fibras (PRFC) y sometidas a flexión. La actividad corrosiva se evalúa utilizando técnicas no destructivas y destructivas.

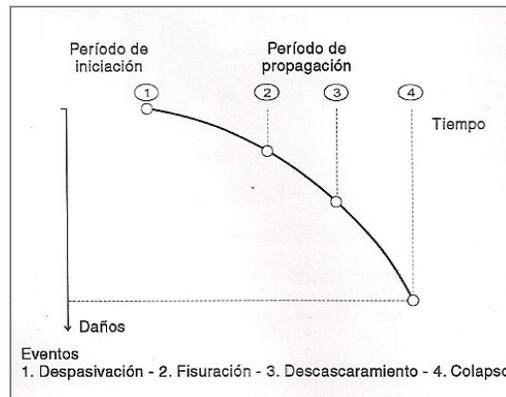


Figura 1. Modelo teórico del proceso de corrosión. (Tutti 1982).

### Programa Experimental

El programa experimental se compone de varias etapas, algunas de las cuales ya fueron concluidas y otras están en ejecución, según el cronograma de trabajo planificado.

El programa propuesto incluye treinta y seis vigas de hormigón armado de 80 x 160 x 1100 mm. En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos de ocho vigas, las cuales fueron divididas en cuatro grupos: el primer grupo incluyó especímenes de referencia o control, no corroídos ni reparados; el segundo, vigas corroídas a largo plazo (90 días) y sin reparar; el tercer grupo, vigas corroídas y reparadas a corto plazo (50 días). Y el cuarto grupo formado por vigas corroídas y reparadas a mediano y largo plazo (70 y 90 días). Las vigas reparadas a los 50 y 70 días de iniciado el proceso de corrosión acelerado, continuaron exponiéndose a dicho proceso hasta completar los 90 días de exposición. Al finalizar este período todas las probetas se ensayaron a flexión. En la Tabla 1 se detallan las vigas ensayadas con su denominación y características.

Tabla 1. Detalle de las vigas ensayadas con su denominación y características.

Denominación	Características	Grupos
V1R y V2R	Viga no reparada ni afectada por corrosión	Referencia o control
V2RD90	Vigas corroídas durante 90 días y no reparadas	Patrón
V1DR50	Viga corroída durante 90 días y reparada a los 50 días	Reparadas a corto plazo
V1DR70, V2DR70 y V3DR70	Vigas corroídas durante 90 días y reparadas a los 70 días	Reparadas a mediano y largo plazo

Denominación	Características	Grupos
V1DR90 y V2DR90	Vigas corroídas durante 90 días y reparadas a los 90 días	

### Descripción de los especímenes ensayados, procedimiento de ensayo e instrumentación

El procedimiento experimental se llevó a cabo mediante ensayos de flexión en cuatro puntos de vigas prismáticas como muestra la Figura 2. Se elaboraron probetas de sección rectangular de: 80 x 160 mm y 1100 mm de longitud. Se adoptó para todas las vigas la misma armadura longitudinal y transversal: barras  $\phi$  8 mm para la armadura de tracción, barras  $\phi$  6 para la armadura constructiva, y estribos  $\phi$  4.2 cada 132.5 mm como armadura a corte. En la Fig. 2 se muestran los detalles de armadura y sección de las vigas.

En todos los especímenes, a excepción de las vigas denominadas de control o referencia que no fueron atacadas por el proceso de corrosión, la armadura principal fue corroída en el tercio medio. La longitud de esta zona fue 500 mm.

En la Figura 3 se presenta el esquema de ensayo e instrumentación utilizado. En general, el instrumental de medición fue retirado antes de alcanzar la carga máxima por seguridad del mismo.

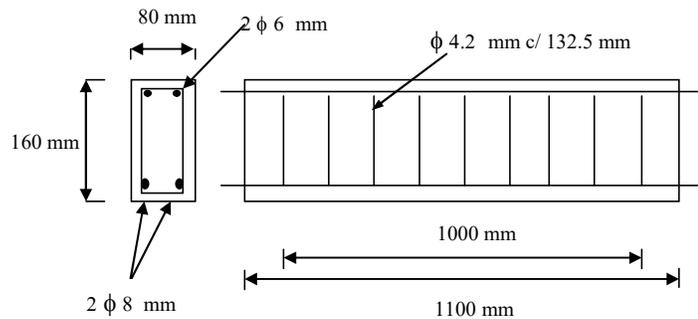


Figura 2. Detalle de armadura y sección de vigas

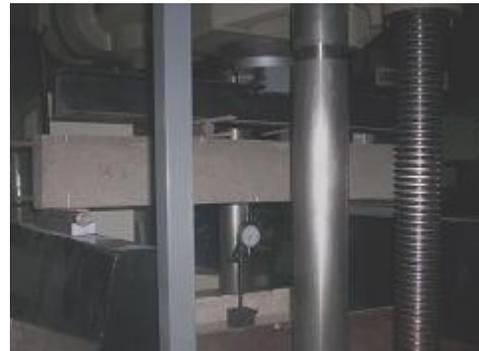
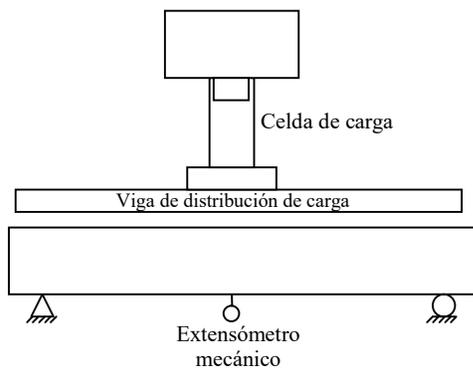


Figura 3. Ensayo a flexión: esquema de ensayo e instrumentación.

Todos los ensayos realizados consistieron en la aplicación de cargas cuasiestáticas monótonas crecientes en el plano y se hicieron con control de cargas. Se midieron cargas y desplazamientos del punto medio de las probetas. La carga fue aplicada usando una prensa Shimatzu con sistema hidráulico y posibilidad de desarrollar una carga vertical nominal máxima de 1000 kN. Para la medición de los desplazamientos se utilizó un reloj comparador (flexímetro) con una sensibilidad de 0.001 mm.

### Propiedades de los materiales

El hormigón utilizado en la ejecución de las vigas se dosificó de acuerdo al reglamento CIRSOC 201:82 [2] en función de obtener una resistencia a compresión a los 28 días de 17 MPa. Se trabajó con agregados de la zona y cemento Portland normal CPN 40 marca ANCAP, una relación a/c=0,53 y asentamiento de 8 cm.

Las características mecánicas del hormigón se determinaron mediante ensayos de compresión uniaxial sobre probetas cilíndricas de 150 x 300 mm, según norma IRAM 1534 [3]. Los resultados se presentan en la Tabla 2, donde también se muestran las propiedades del acero y del refuerzo.

Para las armaduras principal y constructiva se empleó acero de Dureza Natural Acindar denominado comercialmente DN A-42. Para los estribos se usó acero tipo T 500 de diámetro nominal 4,2mm.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del hormigón y el acero.

Propiedades	Hormigón	Acero	PRFC
Resistencia característica compresión, $\sigma_c$ (MPa)	30	-	-
Resistencia última a tracción, $\sigma_{ut}$ (MPa)	-	500	960
Tensión de Fluencia, $\sigma_f$ (MPa)	-	420	-
Módulo de Elasticidad E (MPa)	28000	210000	72500
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0.20	0.30	0.20

### Proceso Acelerado de Corrosión

La actividad de corrosión dentro de las probetas, fue monitoreada durante el proceso corrosivo, con técnicas no destructivas y destructivas. Estas últimas comprendieron mediciones de potenciales electroquímicos con hemicelda de Cu-Sulfato de Cu (norma ASTM C 876-91 [4]), que se realizaron en forma periódica utilizando el equipo CorMap de James. Los potenciales electroquímicos se midieron en cuatro puntos de las vigas. La ubicación de dichos puntos se presenta en la Figura 4.

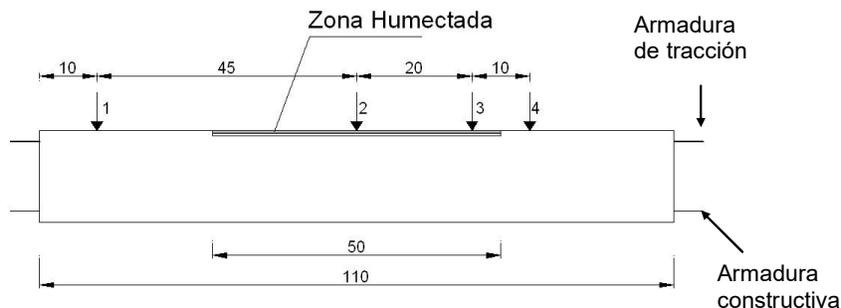


Figura 4. Puntos de medición de potenciales electroquímicos.

Las técnicas destructivas incluyeron la gravimetría de las barras corroídas, con lo cual se obtuvieron las pérdidas reales del material que se compararon con las teóricas calculadas utilizando la ley de Faraday.

### Reparación con PRF

El refuerzo y/o reparación de los especímenes se realizó con un tejido unidireccional de fibra de carbono Sika Wrap Hex 103 C de alto módulo y alta resistencia saturado en obra con el sistema epoxídico Sikadur Hex 300. Las propiedades de la lámina curada se determinaron de acuerdo a las especificaciones suministradas por el fabricante y se detallan en la Tabla 2.

La técnica de refuerzo y/o reparación se realizó aplicando el tejido de fibra de carbono embebido en resina epoxi sobre la superficie de las probetas previamente imprimadas con resina, siguiendo el proceso denominado húmedo.

Se colocó una sola capa de tejido con las fibras orientadas en la dirección del eje longitudinal del elemento a reparar, cubriendo toda la cara inferior traccionada y la mitad de las caras laterales (envoltura en U), con un espesor final (resina + tejido) de 1 mm (Figura 5(a)). Se debe destacar que no se reemplazó el recubrimiento de hormigón dañado ni se limpiaron las barras de acero corroídas.

Luego de ensayos algunos especímenes se observó que el esquema de reparación en forma de U adoptado en un comienzo, generaba una concentración de tensiones en los extremos del refuerzo y por lo tanto en las cercanías de los apoyos. Ello favoreció la formación de fisuras diagonales contribuyendo a la falla por corte. En consecuencia se resolvió cambiar el esquema de reparación y reforzar simultáneamente las vigas a corte de tal modo de asegurar que la resistencia requerida a flexión no se vea comprometida por la falla a corte, y que la rotura por flexión siempre preceda a la de corte. En la Figura 5 (b) se muestra el nuevo esquema de reparación propuesto (esquema 2). El mismo consistió en colocar cuatro bandas de 80 mm de ancho en forma de U cubriendo la cara inferior y el alto total de las laterales entre apoyos (refuerzo a corte) y una banda en toda la longitud y de todo el ancho de la cara traccionada (refuerzo a flexión). Se utilizó el mismo tejido unidireccional de fibras de carbono y resina epoxi resultando el espesor final del refuerzo a corte y flexión de 1 mm.

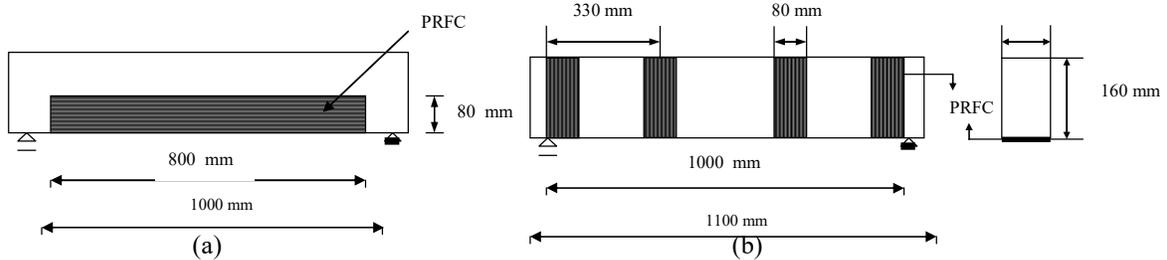


Figura 5. Esquemas de reparación con PRFC: a) Envoltura en “U”; b) Esquema 2.

## Resultados

### Proceso de corrosión acelerado

En la Figura 6 (a) y (b) se representan los valores de potencial electroquímico en función del tiempo, medidos en cuatro puntos de los especímenes V2RD90 (viga patrón corroída por 90 días y sin reparar) y V1DR50 (viga dañada y reparada a los 50 días). En la misma figura se destaca el criterio adoptado por la norma ASTM C 876 [4] con respecto al riesgo de corrosión.

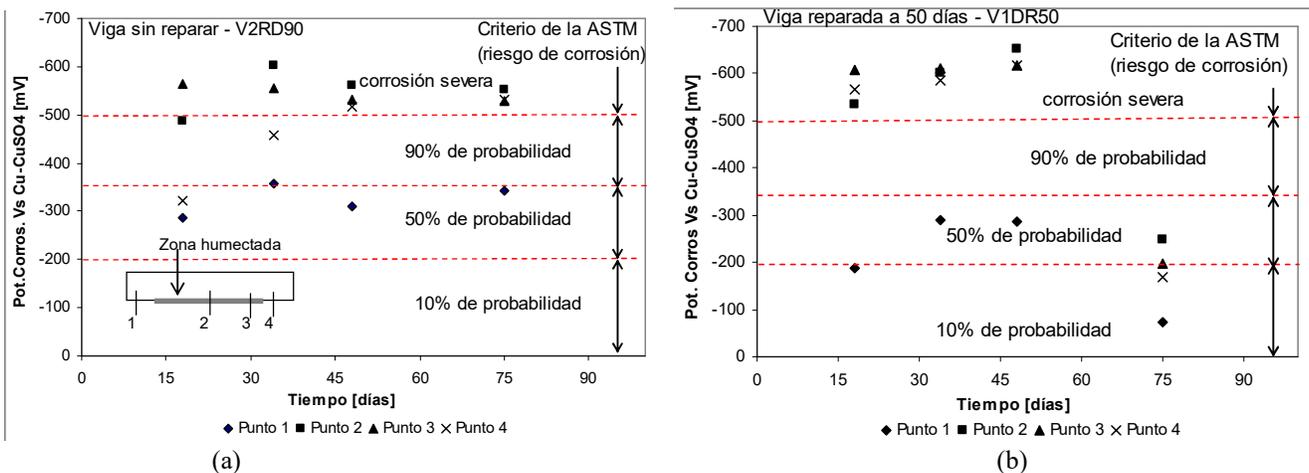


Figura 6. Medición de potenciales electroquímicos: (a) Viga sin reparar; (b) Viga dañada y reparada a los 50 días.

De la comparación de ambos gráficos se observa que para los puntos críticos 2 y 3, los valores de potencial electroquímico al inicio del proceso de corrosión son similares en ambas vigas. Luego para el espécimen sin reparar se puede ver un aumento de dichos valores con el avance del proceso y una tendencia a estabilizarse al final el mismo. En el caso de la viga dañada y reparada a los 50 días y sometida nuevamente al proceso de corrosión acelerada, se observa una significativa disminución de los potenciales electroquímicos con el tiempo. Ello estaría indicando la eficiencia del sistema de reparación con PRFC en lo que respecta a la disminución y detención de la actividad corrosiva, tendencia similar a la observada por otros autores [5].

En la Tabla 4 se presentan los resultados del análisis de gravimetría realizado en las vigas reparadas con PRFC y ensayadas a flexión después de 90 días de exposición a la corrosión. Se muestran las pérdidas de peso, volumen, y sección de la armadura de tracción, así como también las pérdidas teóricas de sección aplicando la ecuación que deriva de la de Faraday, la relación entre la pérdida de sección y el diámetro inicial de las barras de acero  $[PS/\phi_i]$  y la eficiencia del sistema de corrosión acelerado. En general las vigas reparadas a 50 y 70 días perdieron aproximadamente el 5% menos de material que aquellas reparadas al finalizar el ciclo. La reducción de la pérdida de masa puede atribuirse a la menor difusión de humedad y oxígeno que genera el envoltorio con PRFC.

Tabla 4. Gravimetría

Viga	$P_i$ (grs)	$P_f$ (grs)	$P_i - P_f$ (grs)	$P_i - P_f$ (%)	$V_i - V_f$ (mm <sup>3</sup> )	Pérd. Secc. $\phi$ 8 (mm)	Pérd. teórica de secc. (mm)	$P.S./\phi_i$	Eficiencia %
V1DR50	416.76	346.82	69.94	16.71	8966.60	0.83	0.814	0,10	102
V1DR70	416.76	322.56	94.20	22.60	12076.90	1.08	0.814	0,14	133
V2DR70	416.76	344.17	72.59	17.42	9306.40	0.85	0.814	0,11	104
V3DR70	416.76	377.00	39.76	9.54	5098.50	0.52	0.814	0,07	64
V1DR90	416.76	323.94	92.82	22.27	11900	1.07	0.814	0,13	131
V2RD90	416.76	365.72	51.06	12.30	6546.15	0.49	0.814	0,06	60
V2DR90	416.76	364.35	52.41	12.60	6719	0.65	0.814	0,08	80

$P_i$ : Peso inicial,  $P_f$ : Peso final,  $V_i - V_f$ : pérdida de volumen

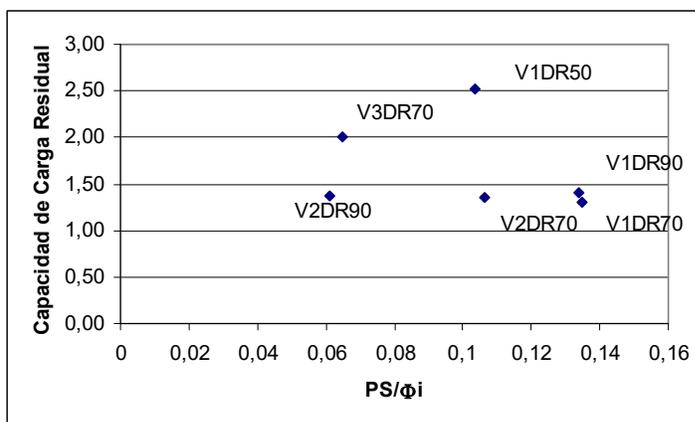


Figura 7. Relación entre la Capacidad de Carga Residual y la pérdida de sección de las barras de acero.

En la Figura 7 se muestra la capacidad de carga residual de las vigas reparadas en función de la relación entre la pérdida de sección y el diámetro inicial de la armadura principal. La capacidad de carga residual se obtuvo dividiendo la carga máxima alcanzada por cada viga dañada y reparada por la carga última de las vigas de referencia, no corroídas ni reparadas. En caso de no existir reparación, la tendencia observada

por otros autores [6] fue un decrecimiento de la capacidad de carga residual con el aumento de la degradación por corrosión  $[PS/\phi_i]$ . En este trabajo y de acuerdo a la Fig. 7 se puede ver para las vigas dañadas y reparadas a los 90 días (V1DR90 y V2DR90) con una degradación importante por corrosión, un pequeño incremento de la capacidad de carga residual con respecto a las vigas de referencias donde la relación  $[PS/\phi_i]$  sería igual a cero. En el caso de las vigas dañadas y reparadas a los 70 días se observa un aumento importante de la capacidad residual de carga para el espécimen V3DR70 mientras que las restantes no mostraron mejoras tan significativas. La viga V1DR50 registró el incremento más importante de la capacidad resistente residual.

### Tipos de falla

La viga de referencia, V1R, no dañada por corrosión y sin reparar, tuvo un tipo de falla frágil y repentina, por corte. Las vigas dañadas y luego reparadas con PRFC, registraron el mismo tipo de rotura, pero a un valor de carga mayor y manteniéndose la integridad de los especímenes, luego de la falla. Generalmente este modo de rotura es provocada por la tensión generada en los extremos del refuerzo. En la Figura 8 se puede ver el tipo de falla de las vigas dañadas y reparadas según los dos esquemas de reparación adoptados.

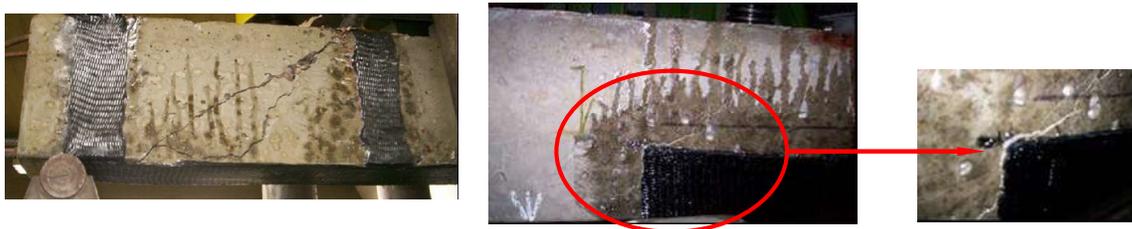


Figura 8. Tipo de falla de vigas no reparadas y vigas dañadas y reparadas con PRFC.

### Diagramas carga-desplazamiento

En las Figura 9 se presentan las curvas carga-desplazamiento ( $P-\delta$ ) correspondientes a las vigas reparadas y ensayadas a los 90 días según esquema de refuerzo 2, denominadas V1DR50, V3DR70, V2DR90 y V3DR90 (vigas dañadas y reparadas a los 50, 70 y 90 días). En la misma Figura se muestra también la comparación con las vigas no reparadas, V1R (viga de referencia no corroída y sin reparar) y V1RD90 (viga de referencia corroída durante 90 días y sin reparar).

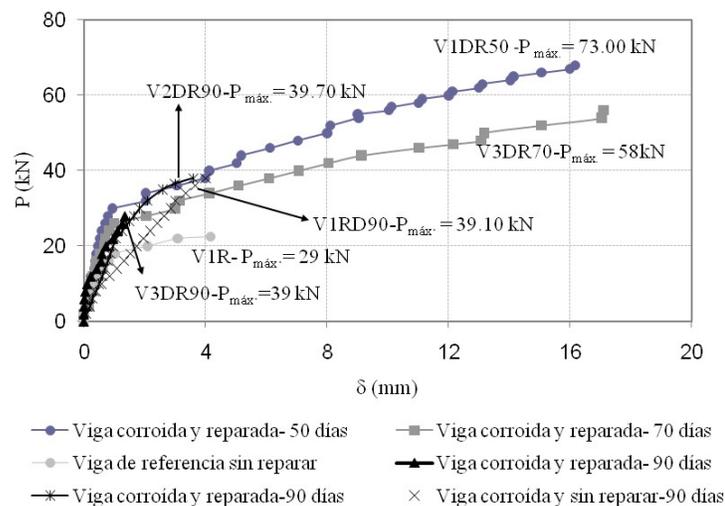


Figura 9. Curvas  $P-\delta$  de vigas dañadas y reparadas. Comparación con vigas no reparadas.

Se observa que las vigas dañadas y reparadas a los 50 y 70 días alcanzaron una mayor rigidez, capacidad resistente y de deformación. En cuanto a las vigas dañadas y reparadas a los 90 días no hay prácticamente diferencia en cuanto a carga última, con la viga corroída durante 90 días y sin reparar. Se debe destacar que solamente se representan gráficamente los resultados correspondientes a una viga reparada a los 70 días (V3DR70) y a los 90 (V2DR90), pues problemas en el sistema de medición de desplazamientos no permiten contar con los registros correspondientes a los otros tres especímenes (V1DR70, V2DR70 y V1DR90). Los valores de carga máxima de todas las vigas se muestran en la misma figura. También se debe mencionar que el instrumental de medición fue retirado por precaución en todos los casos, antes de alcanzar la carga de rotura, razón por la cual no coinciden los valores graficados con los últimos informados sobre el mismo gráfico.

## Conclusiones

Se han presentado resultados de ensayos de flexión en vigas de hormigón armado sometidas a un proceso acelerado de corrosión y reparadas con PRFC. Se evaluó el comportamiento post-reparación de los especímenes, que luego de reparados continuaron con el proceso de corrosión. Se analizaron esquemas de reparación con PRFC y modos de falla. Del análisis y comparación de los resultados obtenidos se puede concluir:

- Las técnicas utilizadas para medir la actividad corrosiva revelaron la disminución de la misma en las vigas reparadas con PRFC. Ello demuestra, aún cuando es necesario realizar un número mayor de ensayos, que el sistema de reparación con PRFC pudo efectivamente detener el proceso de corrosión a que fue sometida la armadura de tracción.
- El refuerzo con PRFC permitió recuperar la resistencia inicial de las vigas e incluso incrementarla significativamente. En cuanto al tipo de rotura, se produjo en general una falla frágil por corte, pero se mantuvo la integridad estructural de los especímenes hasta el final de los ensayos.
- La eficiencia de la técnica de refuerzo y/o reparación con PRFs depende de la configuración adoptada. Por ser el material de refuerzo un material marcadamente ortótropo con valores mayores de resistencia en la dirección de axial de las fibras que en la dirección transversal, si se elige una configuración inadecuada podría resultar en un perjuicio para la estructura.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay, por el apoyo económico brindado para la realización del trabajo, al Profesor Jorge Sota, al Ing. Héctor Retamal y a los Ings. Jorge Rendón y Paulino Maldonado, de Sika Colombia y Sika Argentina, respectivamente, por la donación del material de refuerzo necesario para la realización de los ensayos.

## Referencias

- [1] Carrasco M.F., Defagot C.A., Ulibarrie N.O., Miretti R.E., Grether R.O., Segovia M.D., Marcipar A., Vida en servicio de las estructuras de hormigón armado en la región centro-este argentina, Hormigón 44, (2007). 15-28
- [2] Reglamento CIRSOC 201, Proyecto, Cálculo y Ejecución de Estructuras de Hormigón Armado y Pretensado, (1982).
- [3] IRAM 1534, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales: hormigón de cemento portland. preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorio, (1985).
- [4] ASTM c 876, American National Standard: standard test method for half cell potential of reinforcing steel in concrete, (1991).
- [5] Soudky K., Sherwood T. and Masoud S.: FRP repair of corrosion-damaged reinforced concrete beams, universidad de waterloo, Canadá.
- [6] torres Acosta A., Navarro Gutierrez S., Terán Guillén J., Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams. Engineering Structures 29 (2007) 1145–1152.