

VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO AFECTADAS POR CORROSIÓN Y REPARADAS CON MATERIALES DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRAS (PRFS).

Schierloh M. I.^{1,a}, Rougier V.¹, Souchetti R.F.¹

¹Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Tel/Fax: (03442) 425-541 / 423-803, Ing. Pereira 676, Concepción del Uruguay, E3264BTD, Entre Ríos, Argentina
^aschierlm@frcu.utn.edu.ar

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. Para ello se diseñaron especímenes utilizando cemento CP40. 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

Estamos en presencia de una nueva disciplina donde la imaginación y la intuición tienen un lugar privilegiado. La rehabilitación del patrimonio arquitectónico abre a los arquitectos e ingenieros un campo de aplicación vastísimo, demandando nuevos aspectos de su saber profesional. Es necesario para esto analizar con lógica y atención las características físicas y los valores arquitectónicos de las construcciones existentes, confrontarlas con las nuevas funciones, y evaluar las compatibilidades, antes mismo de incorporar los frutos de la inspiración. Un proceso de este tipo requiere más paciencia, madurez y rigor que el desarrollo de un proyecto totalmente nuevo.

La rehabilitación es una operación que debe tener un carácter excepcional. Cuando las técnicas tradicionales se revelan inadecuadas, la consolidación de una obra puede asegurarse recurriendo a otras técnicas más modernas de conservación y de refuerzo cuya eficacia haya sido demostrada científicamente y garantizada por la experiencia.

Durante los años 2005 y 2006, el Grupo desarrolló un proyecto fundamentado en el relevamiento de estructuras afectadas con diferentes patologías en la región de influencia de la UTN FRCU, cuyas conclusiones indicaron que la afectación principal de las estructuras relevadas ha sido la corrosión de la armadura en la mayoría de los casos.

Edificio del Registro del Estado Civil y Capacidad de las Personas. Este edificio fue construido en 1981 (Figura 1). Se encuentra emplazado en el subsuelo del Centro Cívico donde además en su planta baja y 4 pisos superiores funcionan, en una de las torres, la Municipalidad de la Ciudad y en la otra, el Palacio de Justicia (Figura 1).

El edificio está compuesto por estructura de hormigón armado y mampostería tradicional, con cerramientos vidriados en su frente como se puede observar en la Figura 2.



Figura 1. Centro Cívico, es el edificio público más importante de la ciudad. Allí se congregan el poder político y judicial.



Figura 2. Diferentes vistas de los daños encontrados en la estructura del edificio.

Escuela Normal y Superior de Lenguas Vivas Mariano Moreno (Figura 3).

En este edificio que data de 1915, el sistema constructivo es de mampostería de ladrillos que sostienen viguetas de perfiles metálicos sobre los que se apoyan bovedillas de ladrillos. Su planta está desarrollada en cuatro manzanas.



Figura 3. Escuela Normal y superior de Lenguas Vivas Mariano Moreno.



Figura 4. Diferentes vistas de los daños encontrados en la estructura de la Escuela.

Colegio Superior del Uruguay Justo José de Urquiza. El edificio fue declarado Monumento Histórico Nacional en 1942, fue habilitado en 1851 y ampliado en 1940. El sistema constructivo es de mampostería de ladrillos macizos y perfilaría metálica.



Figura 5. Fachada del Colegio Superior del Uruguay J. J. de Urquiza.



Figura 6. Diferentes vistas de los daños encontrados en la estructura del Colegio.

Los edificios estudiados presentaron serios problemas en sus estructuras, esto se observó a partir de los resultados obtenidos tanto en los relevamientos, como así también en los estudios estadísticos realizados, notándose valores muy elevados, de hasta el 90% en caso de grietas y 89% en corrosión para diferentes elementos. Habiéndose determinado que los procesos corrosivos en la mayoría de las estructuras de hormigón analizadas se deben fundamentalmente a espesores de recubrimientos mínimos o nulos, como así también al uso de materiales y métodos constructivos inadecuados. Basándose en los resultados de los relevamiento realizados en la primera etapa, en el actual trabajo se presenta un estudio de uno de los elementos que se observaron más afectados: las vigas.

La corrosión de las armaduras de aceros representa un problema de gran importancia para las estructuras de hormigón armado por dos razones: primero la corrosión del acero va asociada

con una pérdida considerable de su sección transversal; segundo los residuos de la corrosión ocupan un volumen mayor que el acero original, y ello genera tensiones de tracción en el hormigón que pueden provocar su fisuración o desprendimiento y en consecuencia pérdida de la unión estructural entre armadura y hormigón. De este modo si las fisuras generadas por el proceso corrosivo pueden ser prevenidas o demoradas, se podría conservar un cierto grado de resistencia estructural en las vigas afectadas por corrosión [1].

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 y económica estructuras deterioradas.

Recientes avances en el campo de los materiales poliméricos reforzados con fibras (PRF) han dado como resultado el desarrollo de nuevos materiales con excelentes potenciales para el refuerzo de elementos de hormigón armado en áreas donde los materiales convencionales han fallado. Los PRF tienen una alta relación resistencia- peso, buena durabilidad en ambientes agresivos, son térmicamente estables y resultan especialmente adecuados para estructuras en las que el peso constituye una variable fundamental en el proceso de diseño. No exhiben fluencia, sino que tienen un comportamiento lineal elástico hasta la rotura [2]. Su naturaleza anisótropa permite diseñar el refuerzo y/o reparación según la dirección de la sollicitación máxima de carga. Pueden superar en propiedades de resistencia última y rigidez al acero. Su coeficiente de dilatación es compatible con el del hormigón (o se puede diseñar para que el laminado lo sea). Su instalación es sencilla, menos compleja y destructiva que la del acero. En diversas situaciones no hace falta detener la actividad a la que está sometida la estructura [3].

La técnica de refuerzo y/o reparación con PRF consiste en adherir dichos materiales, láminas preparadas in situ mediante el proceso denominado húmedo o placas prefabricadas, a la parte inferior de la viga, donde se supone se producirán los esfuerzos de tracción. Se utilizan comúnmente tres tipos de PRF:

- PRFV: polímero reforzado con fibras de vidrio
- PRFC: polímero reforzado con fibras de carbono
- PRFA: polímero reforzado con fibras de aramida (fibras orgánicas)

Investigaciones realizadas por otros autores han demostrado que el uso de PRF 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.

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.

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 presentan los resultados obtenidos de 9 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	Viga no reparada ni afectada por corrosión	Referencia o control
V1RD90	Vigas corroídas durante 90 días y no reparadas	Patrón
V2RD90		
V1DR50	Viga corroída durante 90 días y reparada a los 50 días	Reparadas a corto plazo
V1DR70	Vigas corroídas durante 90 días y reparadas a los 70 días	Reparadas a mediano y largo plazo
V2DR70		
V3DR70		
V1DR90	Vigas corroídas durante 90 días y reparadas a los 90 días	
V2DR90		

Descripción de los especímenes ensayados, procedimiento de ensayo e instrumentación

El programa experimental se llevó a cabo mediante ensayos de flexión en cuatro puntos de vigas prismáticas como muestra la Figura 7. 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 ϕ del 8 mm para la armadura de tracción, barras ϕ del 6 para la armadura constructiva, y estribos ϕ del 4,2 cada 132.5 mm como armadura a corte. En la Figura 1 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.

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 0.001mm.

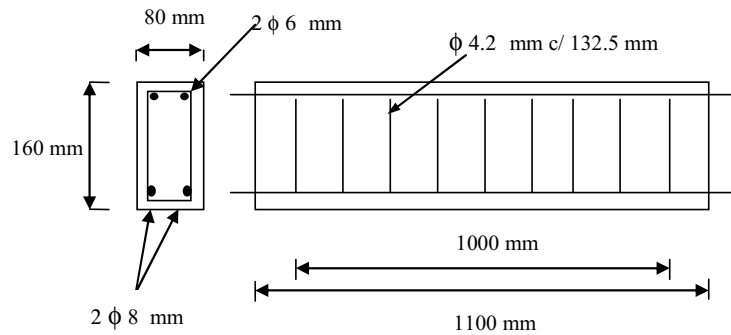


Figura 7. Detalle de armadura y sección de vigas

En la Figura 8 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.

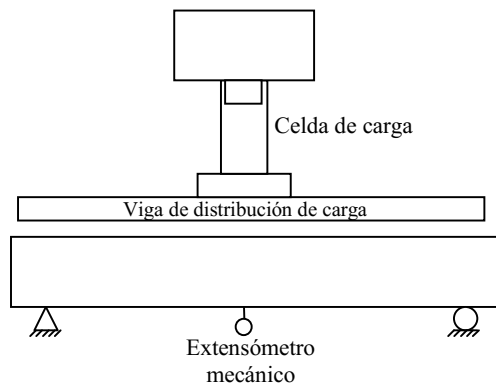


Figura 8. Ensayo a flexión: esquema de ensayo e instrumentación.

Propiedades de los materiales

El hormigón utilizado en la ejecución de las vigas se dosificó de acuerdo al reglamento CIRSOC 201:82 [4] 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 [5] (Figura 9).

Los resultados se presentan en la Tabla 2, donde también se muestran las propiedades del acero de refuerzo.

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



Figura 9. Ensayo de compresión uniaxial.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del hormigón y el acero.

Propiedades	Hormigón	Acero
Resistencia característica compresión, σ_c (MPa)	30	-
Resistencia última a tracción, σ_{ut} (MPa)	-	500
Tensión de Fluencia, σ_f (MPa)	-	420
Módulo de Elasticidad E (MPa)	28000	210000
Coefficiente de Poisson, ν	0.20	0.30

PROCESO ACELERADO DE CORROSIÓN

La actividad de corrosión dentro de las probetas, fue monitoreada durante el proceso corrosivo, con técnicas no destructivas y destructivas. Dentro de las no destructivas se incluyen mediciones de potenciales electroquímicos con hemicelda de Cu-Sulfato de Cu (norma ASTM C 876-91 [6]), que se realizaron en forma periódica utilizando el equipo CorMap de James. Y las destructivas, comprenden 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.

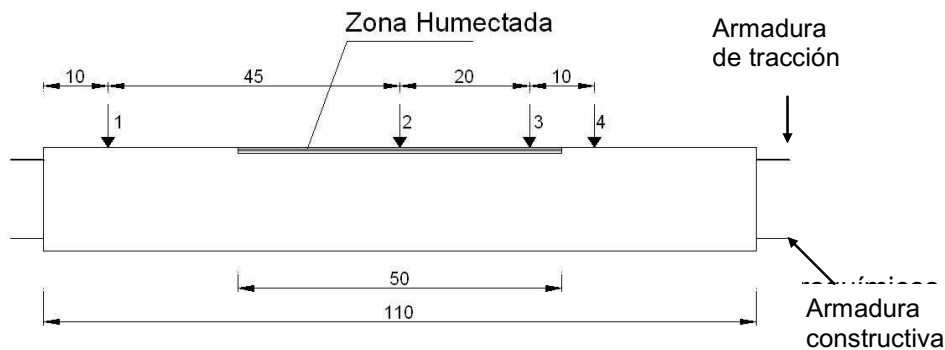
Técnica no destructiva

Con el fin de acelerar el proceso de corrosión se aplicó una corriente externa constante a través de la armadura de tracción (2 Ø 8 mm), para hacerla actuar como ánodo, mediante el uso de una fuente de corriente constante "Oxiviga" con las siguientes características: ajuste de corriente desde 0mA hasta 100 mA, tensión de salida hasta 300V. La zona afectada por la corrosión fue definida por contraelectrodos, realizados con malla de acero inoxidable y colocados en los 50 cm centrales. El contacto de estos contraelectrodos con el hormigón de la viga se efectuó a través de una esponja mojada con una solución al 3% en volumen de Cloruro de Sodio (NaCl), como se puede observar en la Figura 9.



Figura 9. Proceso acelerado de corrosión.

El objeto de emplear esta solución fue, por una parte, para aumentar la conductividad del medio y por otra, para hacer más efectivo el proceso de impresión de la corriente. Se empleó una densidad de corriente $i_{corr} = 140 \mu A / cm^2$, cabe señalar que Andrade et al. [7], informó que en ambientes muy agresivos, se han medido densidades de corriente de corrosión de aproximadamente $100-200 \mu A / cm^2$. Por lo tanto, la densidad de corriente elegida es similar a las medidas en el campo. En el caso de las vigas aquí analizadas se aplicó una intensidad de corriente de 39,6 mA. Este valor se aplicó con el objeto de obtener, en un período de tiempo prudencial, 90 días aproximadamente, un radio de penetración teórica de la corrosión de, al menos, unos 0,40 mm. Luego de lo cual algunas vigas fueron reparadas continuando el proceso de corrosión hasta completar los 90 días y ensayadas a flexión hasta la rotura, otras llegaron al momento de romperse sin haberlas reparado (de referencia). Los potenciales electroquímicos se midieron en cuatro puntos de las vigas. La ubicación de dichos puntos se presenta en la Figura 10.



Técnica destructiva: Gravimetría

Luego de finalizado el período de corrosión acelerada, se rompieron las vigas para observar la forma del ataque, midiéndose las picaduras. Los óxidos se difundieron llenando los poros y generando la fisuración del recubrimiento, por el aumento de volumen que produce su aparición. Posteriormente se limpiaron las barras con una solución de ácido clorhídrico en una concentración 1:1 y se las pesó para obtener las pérdidas gravimétricas con relación al peso inicial. Estos resultados se compararon con los obtenidos teóricamente con la expresión que surge de la Ecuación de Faraday, la cual establece la relación entre la carga eléctrica que circula por la barra y la masa producida en un elemento (en este caso hierro), durante la reacción electroquímica:

$$\frac{m}{PA} = \frac{i \cdot A \cdot t}{z \cdot F}$$

donde:

m : masa del metal corroído

PA : peso atómico del metal

i : densidad de corriente de corrosión.

A : área de metal involucrada.

t : tiempo

z : número de electrones intercambiados por átomo de metal en la reacción de corrosión.

F : constante de Faraday (96487 Coulombs).

Para el caso del hierro:

$$R(t) = R(i) - 0,0116 \cdot i_{\text{corr}} \cdot t$$

donde:

$R(t)$: radio de la barra al tiempo t (mm)

$R(i)$: radio inicial (mm)

t : tiempo del ensayo (años)

i_{corr} : es el valor medio de la densidad de corriente durante el tiempo t ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) y 0,0116 es el factor de conversión de $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ a mm/año para el caso de corrosión homogénea.

Todas las pérdidas de radio se calcularon siguiendo esta ley, es decir que se supuso que la corriente aplicada se consumía solo en la corrosión del acero, vale decir, que se producía una eficiencia de la corriente del 100 %.

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 3.

Tabla 3. Propiedades mecánicas del PRFC.

	PRFC
Módulo de Elasticidad E (MPa)	72500
Resistencia a tracción, σ_t (MPa)	960
Coefficiente de Poisson, ν	0.2
Alargamiento a la rotura (%)	1.33
Espesor (mm)	1

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 (Figura 11).



Figura 11. Técnica de refuerzo y/o reparación con polímeros reforzados con fibras de carbono.

Antes de la colocación del material de refuerzo y /o reparación, las superficies de los especímenes fueron cuidadosamente pulidas con cepillo de cerdas de acero a los efectos de eliminar incrustaciones de mortero y suciedades. Finalmente y para dejarlas perfectamente limpias, se aplicó aire comprimido. 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 12(a)). Se debe destacar que no se reemplazó el recubrimiento de hormigón dañado ni se limpiaron las barras de acero corroídas.

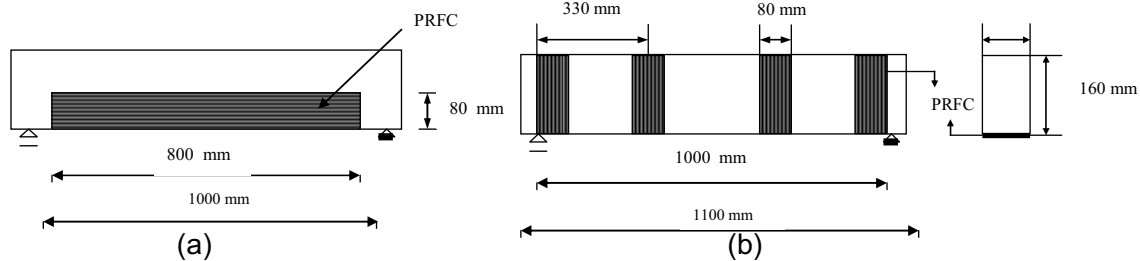


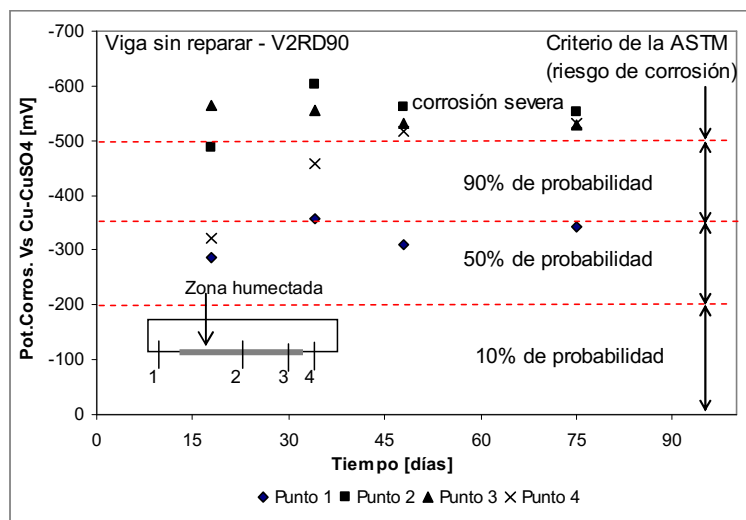
Figura 12. Esquemas de reparación con PRFC: a) Envoltura en "U"; b) Esquema 2.

Luego de ensayados 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 12(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.

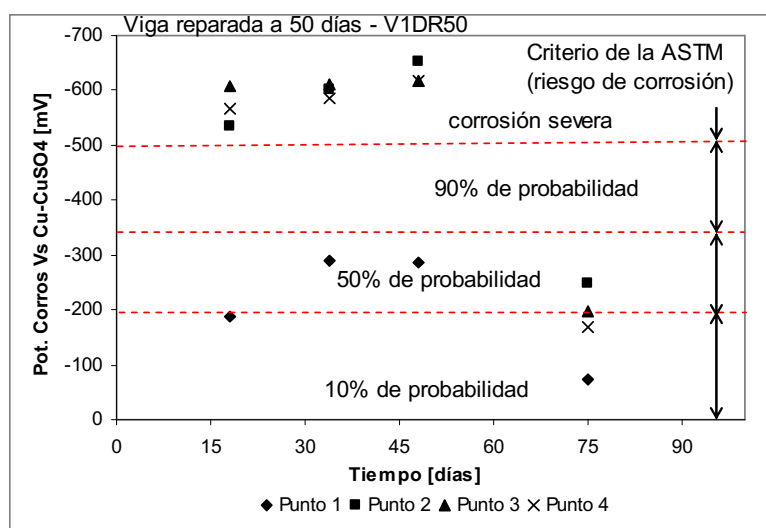
RESULTADOS

Proceso de corrosión acelerado

En la Figura 13 (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 [6] con respecto al riesgo de corrosión. 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 [1], [8].



(a)



(b)

Figura 13. Medición de potenciales electroquímicos: (a) Viga sin reparar; (b) Viga dañada y reparada a los 50 días.

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 la pérdida de peso, volumen, y sección de la armadura de tracción, así como también la pérdida teórica de sección aplicando la ecuación de Faraday (Ec.1). 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.

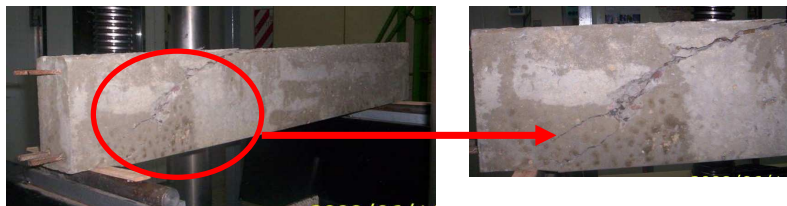
Tabla 4. Gravimetría

Viga	P _i (grs)	P _f (grs)	P _i - P _f (grs)	P _i - P _f (%)	V _i - V _f (mm ³)	Pérdida de sección ϕ 8 (mm)	Pérdida teórica de sección (mm)
V1DR50	416.76	346.82	69.94	16.71	8966.60	0.74	0.814
V1DR70	416.76	322.56	94.20	22.60	12076.90	1.08	0.814
V2DR70	416.76	344.17	72.59	17.42	9306.40	0.77	0.814
V3DR70	416.76	377.00	39.76	9.54	5098.50	0.42	0.814
V1DR90	416.76	323.94	92.82	22.27	11900	1.07	0.814
V2DR90	416.76	364.35	52.41	12.60	6719	0.65	0.814
V1RD90	416.76	314.36	102.40	24.57	13128.04	1.12	0.814
V2RD90	416.76	365.72	51.04	12.30	6546.15	0.54	0.814

P_i: Peso inicialP_f: Peso finalV_i - V_f: pérdida de volumen

Tipos de falla

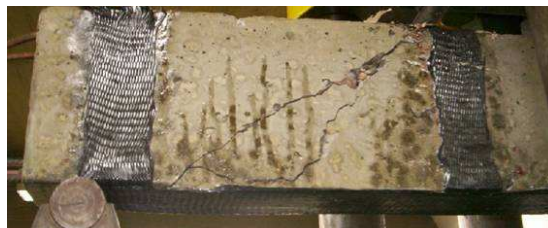
La viga de referencia, V1R, no dañada por corrosión y sin reparar, tuvo un tipo de falla frágil y repentina, por corte. Las vigas dañadas y luego reparadas con PRFC, registraron el mismo tipo de rotura, pero a un valor de carga mayor y manteniéndose la integridad de los especímenes, luego de la falla. Generalmente este modo de rotura es provocada por la tensión generada en los extremos del refuerzo. En la Figura 14 se puede ver el tipo de falla de la viga de referencia, V1R, de la viga corroída durante 90 días y no reparada y de vigas dañadas y reparadas según los dos esquemas de reparación adoptados.



Viga de referencia no corroída



Viga corroída 90 días, sin reparar



Viga corroída y reparada



Viga corroída y reparada.

Figura 14. Tipo de falla de vigas no reparadas y vigas dañadas y reparadas con PRFC.

Diagramas carga-desplazamiento

En las Figura 10 se presentan las curvas carga-desplazamiento ($P-\delta$) correspondientes a las vigas reparadas y ensayadas a los 90 días según esquema de refuerzo 2, denominas 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).

Tabla 5. Resultados experimentales.

Espécimen	P_{rot} (kN)
V1R	29.00
V1RD90	39.10
V1DR50	73.00
V1DR70	37.80
V2DR70	39.42
V3DR70	58.00
V1DR90	40.90
V2DR90	39.70
V2RD90	39.00

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 Tabla 5. 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 mostrados en la Tabla 5 con los gráficos de la Figura 15.

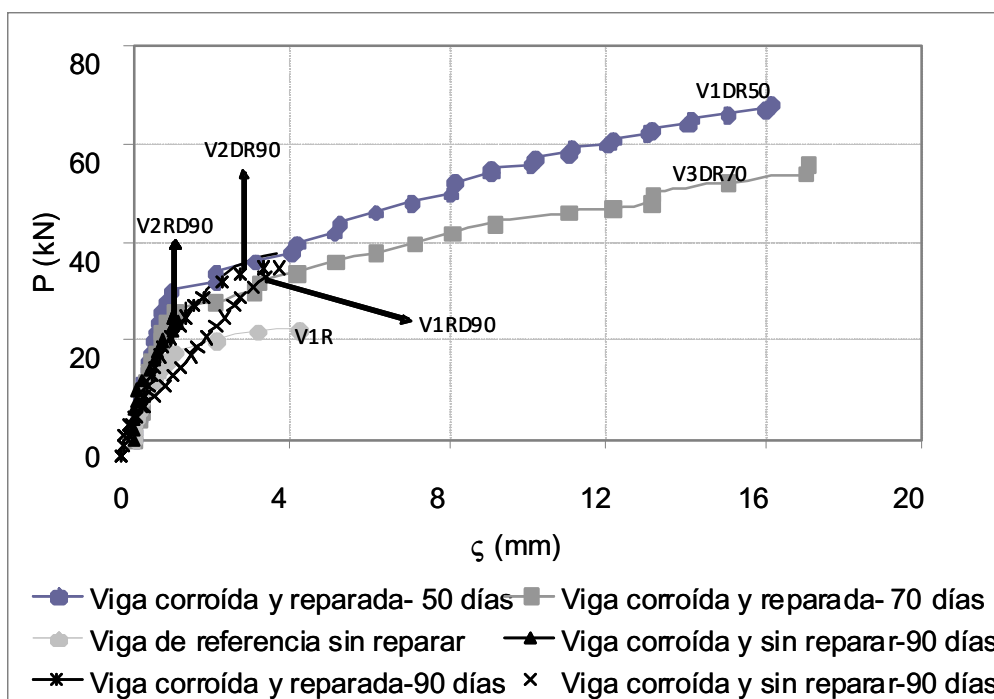


Figura 15. Curvas P- ζ de vigas dañadas y reparadas. Comparación con vigas no reparadas.

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 incrementar significativamente la resistencia última de la viga. 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] MASOUD S. and SOUDKY K.: Cement & Concrete Composites Vol 28 (2006), p.969-977.
- [2] ROUGIER V. C.: REFUERZO DE MUROS DE MAMPOSTERÍA CON MATERIALES COMPUESTOS, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Tucumán (2007).
- [3] MOLERA D.: REFUERZO Y REPARACIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO CON LAMINADOS DE MATRIZ POLIMÉRICA REFORZADOS CON FIBRA CONTINUA DE CARBONO O VIDRIO, Proyecto fin de carrera, Universidad Politécnica de Madrid, (2001).
- [4] Reglamento CIRSOC 201, PROYECTO, CÁLCULO Y EJECUCIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO Y PRETENSADO, (1982).
- [5] IRAM 1534, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales: HORMIGÓN DE CEMENTO PORTLAND. PREPARACIÓN Y CURADO DE PROBETAS PARA ENSAYOS EN LABORATORIO, (1985).
- [6] ASTM C 876, American National Standard: STANDARD TEST METHOD FOR HALF CELL POTENTIAL OF REINFORCING STEEL IN CONCRETE, (1991).
- [7] ANDRADE C., ALONSO C., FELIÚ S. and GONZÁLEZ J.: PROGRESS ON DESIGN AND RESIDUAL LIFE CALCULATION WITH REGARD TO REBAR CORROSION IN REINFORCED CONCRETE. TECHNIQUES TO ASSESS THE CORROSION ACTIVITY OF STEEL REINFORCED CONCRETE STRUCTURES, ASTM STP 1276, Philadelphia, PA, USA, (1996).
- [8] SOUDKY K., SHERWOOD T. and MASOUD S.: FRP REPAIR OF CORROSION-DAMAGED REINFORCED CONCRETE BEAMS, Universidad de Waterloo, Canadá.