



## REFUERZO Y REHABILITACIÓN DE ESTRUCTURAS

### Vigas de hormigón armado dañadas por corrosión y reparadas con polímeros reforzados con fibras

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

<sup>1</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Tel/Fax: (03442) 425-541 / 423-803, Ing. Pereira 676, Concepción del Uruguay, E3264BTD, Entre Ríos, Argentina

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

**Palabras-clave:** Refuerzo a flexión, FRP, Corrosión

#### Resumen.

La corrosión de las armaduras de acero es uno de los principales problemas que afecta la durabilidad de las estructuras de hormigón armado y que se traduce en una pérdida de la seguridad estructural. En consecuencia se hace necesaria una rápida reparación y/o refuerzo. En el caso de vigas, se ha demostrado experimentalmente que el refuerzo con polímeros reforzados con fibras (PRF) confina las fisuras producidas por la expansión de los productos resultantes de la corrosión, manteniendo la integridad estructural y mejorando la resistencia última a flexión. Sin embargo para enriquecer el conocimiento existente sobre el tema y mejorar las técnicas de intervención, es necesario contar con un mayor número de resultados experimentales donde además se evalúe la influencia de los PRF en la evolución del proceso corrosivo de elementos dañados y reparados.

En este trabajo se estudia experimentalmente el comportamiento post-reparación a flexión de vigas de hormigón armado dañadas por corrosión y reparadas con PRF. Se evalúa la actividad del proceso corrosivo en las vigas reparadas y se presentan también comparaciones entre valores experimentales de carga máxima y estimaciones realizadas a partir de dos formulaciones empíricas existentes en la literatura.

#### Introducción

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 productos 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 el refuerzo y el 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 corroídas [1].

Los métodos tradicionales para la 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 la corrosión 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. Los valores de carga máxima obtenidos experimentalmente se comparan con las predicciones de dos modelos empíricos existentes.



## Programa Experimental

El programa experimental se compone de varias etapas, algunas de las cuales ya fueron concluidas, otras están en ejecución y las restantes serán realizadas próximamente, 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	Viga corroída durante 90 días y no reparada	Patrón
V1DR50	Viga corroída durante 90 días y reparada a los 50 días	Reparadas a corto plazo
V1DR70	Viga corroída durante 90 días y reparada a los 70 días	Reparadas a mediano y largo plazo
V2DR70	Viga corroída durante 90 días y reparada a los 70 días	
V3DR70	Viga corroída durante 90 días y reparada a los 70 días	
V1DR90	Viga corroída durante 90 días y reparada a los 90 días	
V2DR90	Viga corroída durante 90 días y reparada a los 90 días	
V3DR90	Viga corroída durante 90 días y reparada a los 90 días	

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

El programa experimental se llevó a cabo mediante ensayos de flexión en vigas prismáticas sobre las cuales se aplicaron cargas puntuales en los tercios de la luz. 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  $\phi$  del 8 mm para la armadura de tracción, barras  $\phi$  del 6 para la armadura constructiva, y estribos  $\phi$  del 4.2 cada 132.5 mm como armadura a corte. En la Fig. 1 se muestran los detalles de armadura y sección de las vigas.

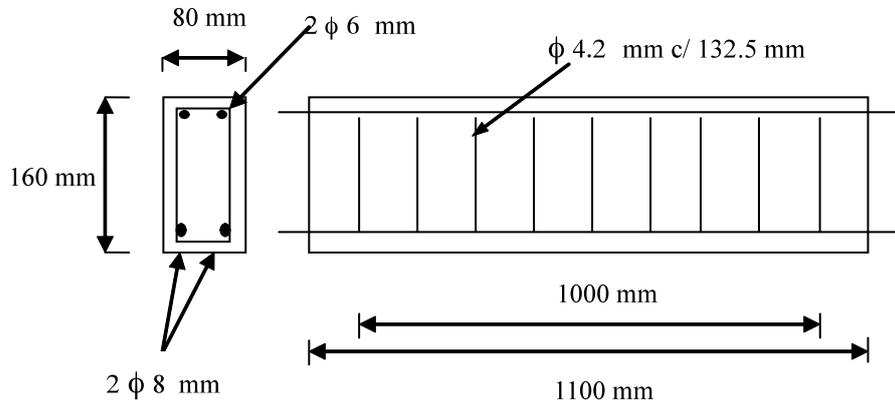


Figura 1: Detalle de armadura y sección de vigas

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 Shimadzu 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. En la Fig. 2 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.

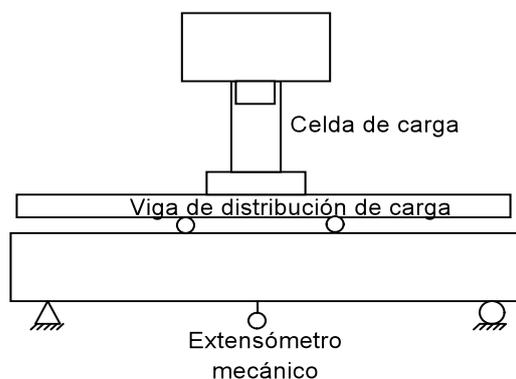


Figura 2: Ensayo a flexión: esquema de ensayo e instrumentación

### 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 30 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] (Fig. 3). 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 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.



Figura 3: Ensayo de compresión uniaxial

Tabla 2: Propiedades mecánicas del hormigón y el acero.

Propiedades	Hormigón	Acero
Resistencia característica compresión, $\sigma_c$ (MPa)	30	-
Resistencia última a tracción, $\sigma_{ut}$ (MPa)	-	5000
Tensión de Fluencia, $\sigma_f$ (MPa)	-	4200
Módulo de Elasticidad E (MPa)	28000	210000
Coefficiente de Poisson, $\nu$	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 ( $2 \phi 8$  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 Fig. 4. 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  $i_{corr} = 140 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ , 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  $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ . 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. Los potenciales electroquímicos se midieron en cuatro puntos de las vigas. La ubicación de dichos puntos se presenta en la Fig. 5.



Figura 4: Proceso acelerado de corrosión

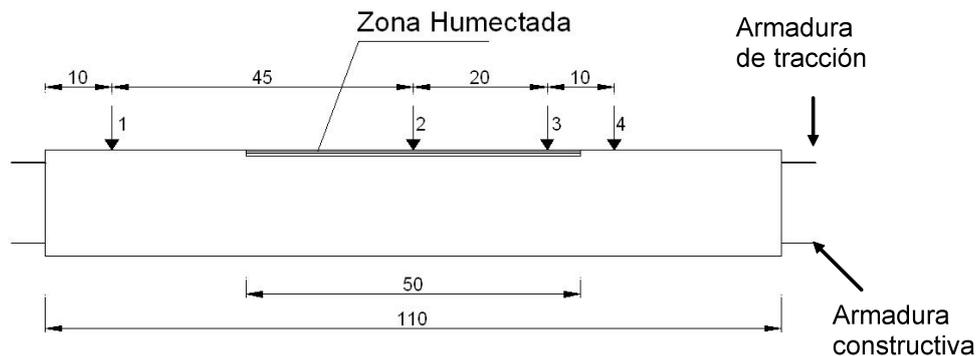


Figura 5: Puntos de medición de potenciales electroquímicos

#### *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:

$$\frac{m}{PA} = \frac{i \cdot A \cdot t}{z \cdot F} \quad (1)$$

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).

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.

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 (Fig. 6). 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 (Fig. 7 a). Se debe destacar que no se reemplazó el recubrimiento de hormigón dañado ni se limpiaron las barras de acero corroídas.

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 formación de fisuras diagonales y provocó 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 Fig. 7 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.

Tabla 3: Propiedades mecánicas del PRFC.

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



Figura 6: Técnica de refuerzo y/o reparación con polímeros reforzados con fibras de carbono

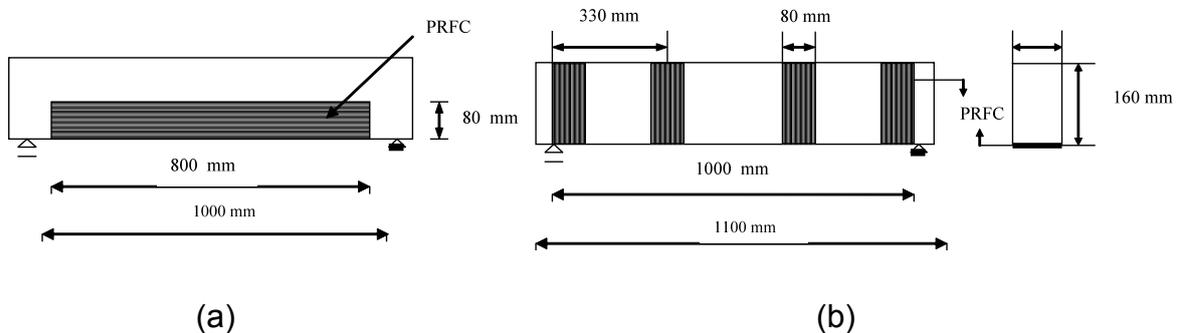
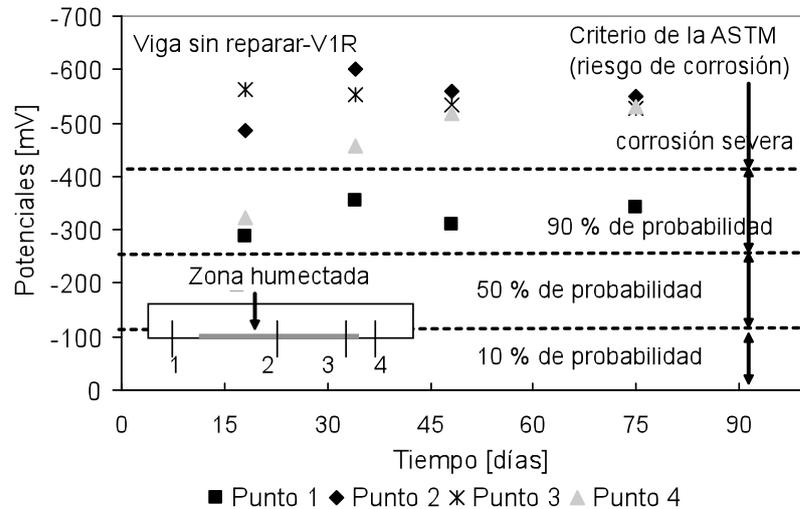


Figura 7: Esquemas de reparación con PRFC: a) Envoltura en "U"; b) Esquema 2

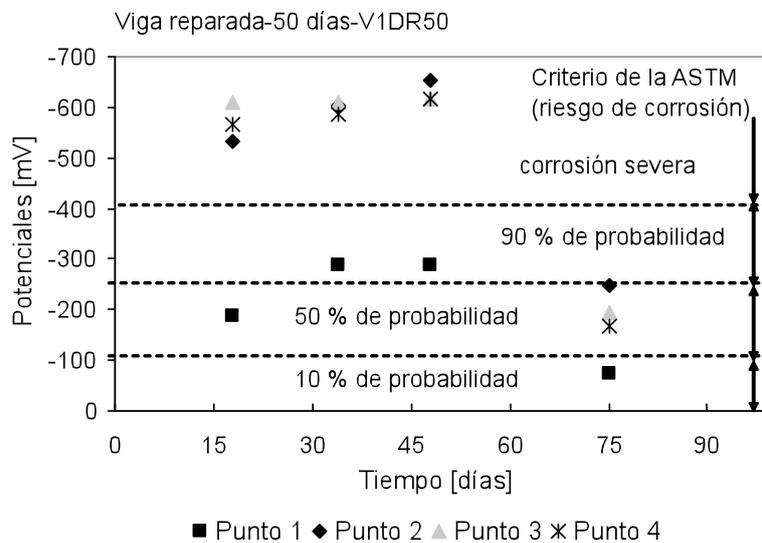
## Resultados

### Proceso de corrosión acelerado

En la Fig. 8 (a) y (b) se representan los valores de potencial electroquímico en función del tiempo, medidos en cuatro puntos de los especímenes V1R (viga de referencia 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 [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 del mismo (75 días). 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 8: 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 penetración media del ataque de la armadura de tracción (barras  $\phi$  8), así como también la penetración teórica del ataque 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. En la mayoría de los casos se puede ver una subestimación de la penetración media del ataque aplicando la formulación teórica.



Tabla 4: Gravimetría

Viga	P <sub>i</sub> (grs)	P <sub>f</sub> (grs)	P <sub>i</sub> - P <sub>f</sub> (grs)	P <sub>i</sub> - P <sub>f</sub> (%)	V <sub>i</sub> - V <sub>f</sub> (mm <sup>3</sup> )	Penetración media del ataque (mm)	Penetración teórica del ataque (mm)
V1DR50	416.76	346.82	69.94	16.71	8966.60	0.83	0.81
V1DR70	416.76	322.56	94.20	22.60	12076.90	1.08	0.81
V2DR70	416.76	344.17	72.59	17.42	9306.40	0.85	0.81
V3DR70	416.76	377.00	39.76	9.54	5098.50	0.52	0.81
V1DR90	416.76	323.94	92.82	22.27	11900.00	1.07	0.81
V2DR90	416.76	365.72	51.04	12.30	6546.15	0.49	0.81
V3DR90	416.76	364.35	52.41	12.60	6719.00	0.65	0.81

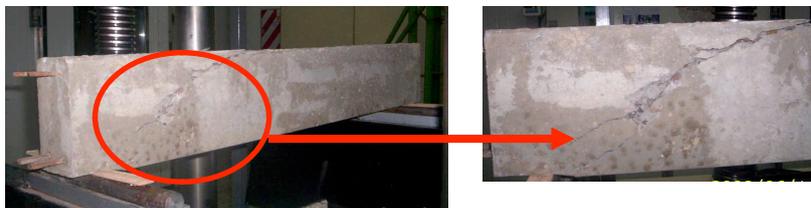
P<sub>i</sub>: Peso inicial

P<sub>f</sub>: Peso final

V<sub>i</sub> - V<sub>f</sub>: 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 rotura es provocada por la tensión generada en los extremos del refuerzo. En la Fig. 9 se puede ver el tipo de falla de la viga de referencia, V1R y de la viga corroída durante 90 días y no reparada. En la Fig. 10 se muestran los modos de rotura de las vigas dañadas y reparadas según los dos esquemas de reparación adoptados.



Viga de referencia no corroída



Viga corroída durante 90 días

Figura 9: Tipo de falla de vigas no reparadas

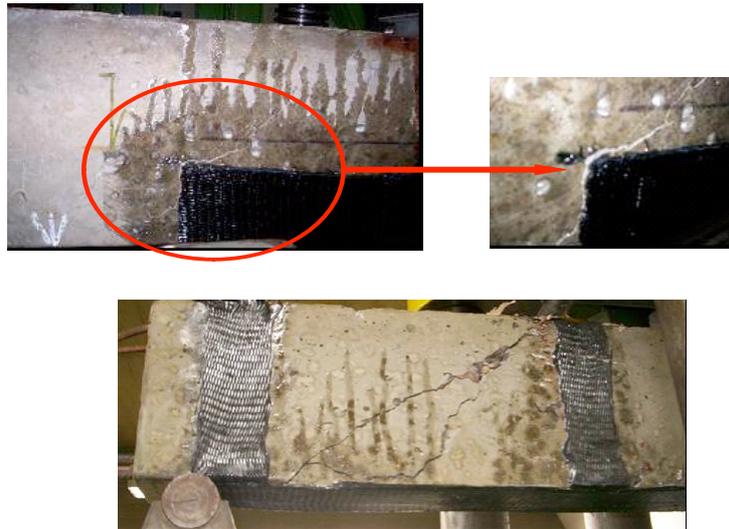


Figura 10: Tipo de falla de vigas dañadas y reparadas con PRFC

### Diagramas carga-desplazamiento

En la Fig. 11 se presentan las curvas carga-desplazamiento ( $P-\delta$ ) correspondientes a las vigas reparadas y ensayadas a los 90 días según esquema de refuerzo 2 (Fig. 7 b), 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). 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 dos a los 90 (V2DR90 y V3DR90), 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 Fig. 11.

Tabla 5: Resultados experimentales.

Especímen	$P_{rot}$ (kN)
V1R	29.00
V1RD90	39.10
V1DR50	73.00
V1DR70	37.80
V2DR70	39.42
V3DR70	58.00



Espécimen	$P_{rot}$ (kN)
V1DR90	40.90
V2DR90	39.70
V3RD90	39.00

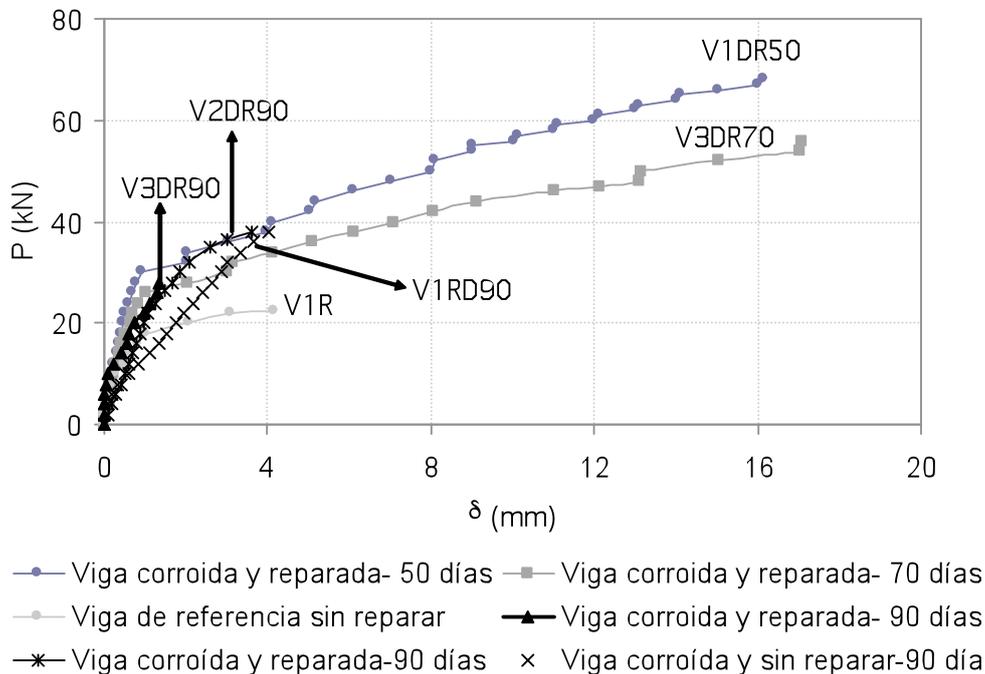


Figura 11. Curvas P-δ de vigas dañadas y reparadas. Comparación con vigas no reparadas

## Determinación de la capacidad resistente a corte según modelos empíricos existentes. Comparación con resultados experimentales

### Introducción

A continuación se presentan los valores de resistencia a corte calculados según la norma ACI 440.2R-02 [9] y la formulación propuesta por Li et al [10], para las vigas de hormigón armado reparadas con PRF descritas en este trabajo y la comparación con los valores experimentales obtenidos. Considerando los resultados de los ensayos de compresión uniaxial se adoptó un valor promedio de resistencia a la compresión  $f'_c = 30$  MPa.

### Norma ACI 440.2R-02 [9]

La resistencia a corte que puede aportar el sistema de refuerzo con PRF se basa en diversos factores que incluyen la geometría de la viga, el esquema de refuerzo y la resistencia a compresión del hormigón.

Según la norma ACI 440 2R-02, la resistencia nominal a corte de un elemento de hormigón armado reforzado con PRF se puede calcular como la



suma de las contribuciones de las resistencias del hormigón, de la armadura transversal de acero (estribos) y del refuerzo de PRF:

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (2)$$

donde  $V_u$ ,  $V_c$ ,  $V_s$ ,  $V_f$  son la resistencia requerida a corte, la resistencia nominal a corte proporcionada por el hormigón armado, la resistencia nominal a corte proporcionada por los estribos de acero y la resistencia nominal a corte proporcionada por el refuerzo de PRF, respectivamente.  $\phi$  y  $\psi$  son factores de reducción de tensiones. El valor de  $\psi$  depende del esquema de reparación y/o refuerzo adoptado

La contribución de la resistencia a corte proporcionada por el sistema de refuerzo con PRF,  $V_f$  se determina a través de la siguiente ecuación:

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\text{sen} \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} \quad (3)$$

$$A_{fv} = 2 n t_f w_f \quad (4)$$

$$f_{fe} = \varepsilon_{fe} E_f \quad (5)$$

$A_{fv}$ ,  $w_f$  y  $d_f$  son el área, el ancho y la altura del refuerzo de PRF, respectivamente, Figura 11,  $s_f$  y  $f_{fe}$  son la distancia entre centros de bandas de PRF, Fig. 12, y la tensión efectiva en el PRF, esto es el nivel de tensiones alcanzado al producirse la falla de la sección.  $\varepsilon_{fe}$  es la deformación efectiva en el PRF; máxima deformación que puede alcanzar el PRF en la última etapa de carga:

$$\varepsilon_{fe} = \kappa_v \varepsilon_{fu} \leq 0.004 \quad (6)$$

donde  $\varepsilon_{fu}$  es la deformación al producirse la rotura del PRF y  $\kappa_v$  un coeficiente de reducción aplicado al corte; es función de la resistencia del hormigón, del tipo de esquema de refuerzo con PRF adoptado y de la rigidez del laminado:

$$\kappa_v : \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (7)$$

$$L_e = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0.58}} \quad (8)$$

$$k_1 = \left( \frac{f'_c}{27} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (9)$$

$$k_2 = \frac{d_f - L_e}{d_f} \quad (10)$$



$L_e$  :longitud de adherencia efectiva del refuerzo con PRF;  $k_1$  :coeficiente que tiene en cuenta la resistencia del hormigón;  $k_2$  :coeficiente que tiene en cuenta el esquema de refuerzo con PRF adoptado.

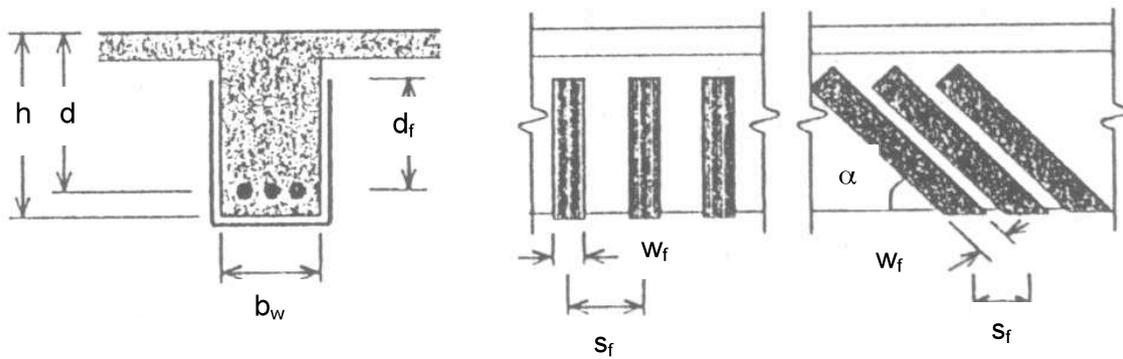


Figura 12: Variables utilizadas en el dimensionamiento del refuerzo a corte con PRF

#### Modelo de Li et al [10]

Li et al [10] proponen un modelo analítico basado en datos experimentales, capaz de predecir la contribución del sistema de refuerzo con PRFC a la capacidad resistente a corte de una viga de hormigón armado.

La formulación propuesta supone una analogía entre el refuerzo externo con PRFC y el refuerzo interno de acero de la viga y basa en las siguientes suposiciones:

- Adherencia perfecta entre el hormigón y el PRF
- Comportamiento lineal elástico hasta la rotura del PRFC
- Después de aplicado el refuerzo externo con PRF no se tienen en cuenta las tensiones de tracción en el hormigón
- Se considera un ángulo de inclinación de las fibras del CPRF de  $45^\circ$  con respecto al eje longitudinal de la viga

De este modo la contribución a corte del PRFC se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$V_f = K_3 \rho_f f_{je} A_f \text{sen} \beta \quad (11)$$

donde:  $\rho_f$  es la cuantía del refuerzo externo de PRFC,  $\beta$  el ángulo de inclinación de las fibras del PRFC con respecto al eje longitudinal de la viga y  $K_3$  un coeficiente que tiene en cuenta la distancia entre estribos:

$$K_3 = \sqrt[3]{\frac{s}{a}} \quad (12)$$

Donde  $s$  es la separación entre estribos y  $a$  la luz de corte.



$$f_{je} = Rf_{fu} \quad (13)$$

$$R : \text{coeficiente de reducción: } R : \rho_f \frac{A_f}{ad_s} \quad (14)$$

$d_s$  es la altura efectiva de la sección transversal de la viga y  $f_{fu}$  la tensión nominal de diseño del PRFC

Finalmente la fuerza total de corte se puede determinar a partir de la siguiente ecuación:

$$V_u = 0.5bd \left[ K_1 K_2 \sqrt[3]{\rho} + \frac{\sqrt{f'_c}}{K_2} \rho_v f_{ye} \right] + \sqrt[3]{\frac{s}{a}} R \rho_f f_{fu} A_f \text{sen} \beta \quad (15)$$

donde  $b$  es el ancho de la viga,  $K_1$  y  $K_2$  son coeficientes que tienen en cuenta el efecto del tamaño máximo del agregado grueso y características del hormigón armado tales como resistencia a compresión y cuantía de acero:

$$K_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{d}{25d_a}}} \quad (16)$$

$$K_2 = \sqrt{f'_c} + 250 \sqrt{\rho_s \left( \frac{d}{a} \right)^5} \quad (17)$$

$d_a$  es el tamaño máximo del agregado grueso y  $\rho_s$  la cuantía de acero

En la Tabla 6 se muestra la comparación de la carga última obtenida experimentalmente con los valores calculados a partir de la norma ACI 440.2R-02 [9] y la formulación de Li et al [10]. Se debe destacar que solo figuran en Tabla los valores experimentales correspondientes a las vigas reparadas con el esquema de refuerzo tipo 2, Fig. 7 b.

Tabla 6: Comparación de valores de carga última, experimentales y empíricos, de vigas de hormigón dañadas y reparadas con PRFC

Espécimen	P <sub>última</sub> Exp. (kN)	P <sub>última</sub> ACI (kN)	P <sub>última</sub> Li et al [10] (kN)	P <sub>exp</sub> /P <sub>ACI</sub>	P <sub>exp</sub> /P <sub>[10]</sub>
V1DR50	73.00	35.91	36.00	2.03	2.03
V2DR70	39.42	35.60	35.55	1.11	1.10
V3DR70	58.00	38.06	38.24	1.52	1.52
V2DR90	39.70	38.30	38.31	1.03	1.04
V3DR90	39.00	37.05	37.07	1.05	1.05



Se puede ver en la Tabla que tanto los valores de carga última calculados a partir de la norma ACI 440.2R-02 como los obtenidos a partir de la formulación de Li et al [10], calibrada con datos experimentales propios, subestiman la eficiencia del refuerzo con PRF, resultando estimaciones conservadoras.

## 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 axial de las fibras que en la dirección transversal, si se elige una configuración inadecuada podría resultar en un perjuicio para la estructura.

La comparación de los resultados experimentales con valores empíricos calculados a partir de modelos existentes en la literatura ha resultado en general satisfactoria, con estimaciones aceptables en algunos casos y significativamente conservadoras en otros.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional C. 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] S. Masoud and K. Soudky: Cement & Concrete Composites Vol 28 (2006), p.969-977.
- [2] V. C. Rougier: Refuerzo de Muros de Mampostería con Materiales Compuestos, Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Tucumán (2007).



- [3] D. Molera: 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] C. Andrade, C. Alonso, S. Feliú and J. González: 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] K. Soudky, T. Sherwood and S. Masoud: FRP Repair of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams, Universidad de Waterloo, Canadá.
- [9] ACI 440.2R-02: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures, (2002).
- [10] A. Li, Ch. Diagana and Y. Delmas: Engineering Structures Vol 23 (2001), p.1212-1220.