

CONFRONTACION DE FORMULACIONES EMPIRICAS Y VALORES EXPERIMENTALES DE VIGAS DE HORMIGON ARMADO, DAÑADAS POR CORROSION Y REPARADAS CON POLIMEROS REFORZADOS CON FIBRA.

González Federico, Gómez Erika, Fernández Facundo.

Departamento de Ingeniería Civil

Facultad Regional Concepción del Uruguay.

Universidad Tecnológica Nacional.

E3264BTD Ing. Pereira 676 Concepción del Uruguay. Argentina.

e-mail: gomezrika15@gmail.com

e-mail: federicoalejanrogonzalez@hotmail.com

Palabras claves: Reparación, Corrosión, Hormigón, Polímeros reforzados.

Resumen. *Uno de los principales problemas que afecta la durabilidad del hormigón armado es la corrosión de sus armaduras, lo que se traduce en pérdida de resistencia mecánica. Para el caso de vigas, diversos trabajos de investigación indicaron que el uso de refuerzos con polímeros reforzados con fibras (PRF) logra confinar las fisuras producidas por la expansión de los productos resultantes de la corrosión, manteniendo la integridad estructural y mejorando la resistencia última a la flexión. Sin embargo, la vida de servicio y la efectividad de esta técnica de refuerzo cuando se aplica al hormigón en ambientes corrosivos, no son todavía muy conocidas.*

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

1 INTRODUCCION

La corrosión de las armaduras de acero representa un problema de gran importancia para las estructuras de hormigón armado pues está asociada con una pérdida considerable de la sección transversal de las barras y sus residuos ocupan un volumen mayor que el acero original. Esto genera tensiones de tracción en el hormigón que pueden provocar su fisuración y 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, las cuales

no resultan del todo eficientes pues son vulnerables a la corrosión.

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 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. Su instalación es sencilla y en diversas situaciones no hace falta detener la actividad de la estructura [3].

La técnica de refuerzo y/o reparación con PRF consiste en adherir dichos materiales a la parte inferior de la viga, donde se supone se producirán los esfuerzos de tracción.

2 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.

En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos de 9 vigas de 80 mm x 160 mm x 1100 mm, las cuales fueron divididas en cuatro grupos: el primer grupo incluyó especímenes de referencia o control, no corroídos ni reparados; el segundo, vigas

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.

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.

2.1 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. 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.

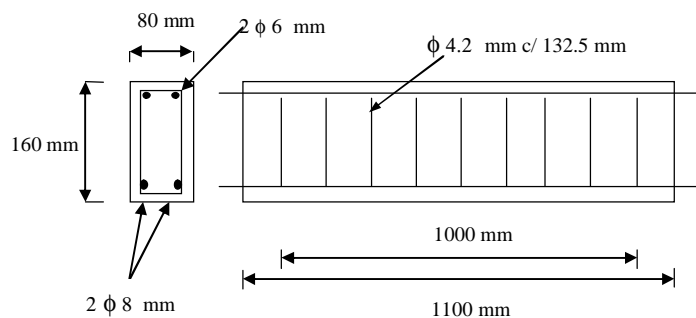


Figura 1: Detalle de armadura y sección de vigas

En todos los especímenes, a excepción de las vigas denominadas de control o referencia, 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 Figura 2 se presenta el esquema de ensayo e instrumentación utilizado.

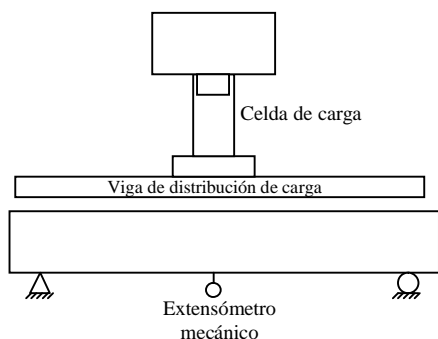


Figura 2: Ensayo a flexión: esquema de ensayo e instrumentación

2.2 Propiedades de los materiales.

El hormigón utilizado 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 80 mm. 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]. Los resultados se presentan en la Tabla 1, 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.

Tabla 1: 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

2.3 Proceso acelerado de corrosión

La actividad de corrosión dentro de las probetas, fue monitoreada durante el proceso

corrosivo, con técnicas no destructivas y destructivas.

2.3.1 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. Se empleó una densidad de corriente $i_{corr} = 140 \mu A / cm^2$. 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 3.

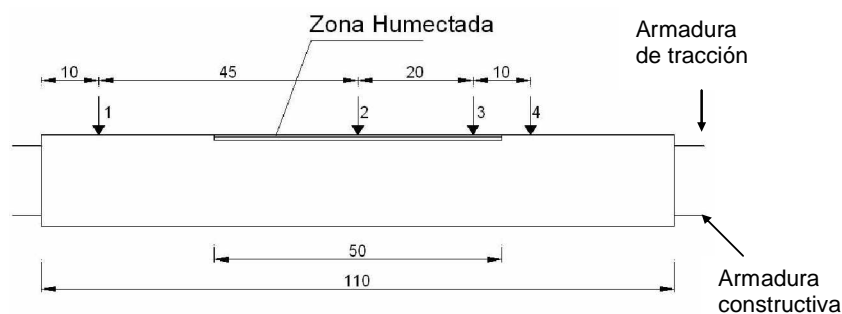


Figura 3: Puntos de medición de potenciales electroquímicos

2.3.2 Técnica destructiva: Gravimetría

Luego de finalizado el período de corrosión acelerada, se rompieron las vigas para observar

la forma del ataque, midiéndose las picaduras. 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.

Todas las pérdidas de radio se calcularon siguiendo dicha 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 %.

2.4 Reparación con PRF

El refuerzo 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 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. Antes de la colocación del material de refuerzo, las superficies de los especímenes fueron pulidas con cepillo de cerdas de acero a los efectos de eliminar incrustaciones de mortero y suciedades. Finalmente 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 4a). 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 adoptado 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 y provocó la falla por corte. En consecuencia se resolvió cambiar el esquema de reparación y reforzar simultáneamente las vigas a corte. 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) Figura 4b (esquema 2). Se utilizó el mismo tejido de fibras de carbono y resina epoxi resultando el espesor final del refuerzo a corte y flexión de 1 mm.

Tabla 2: Propiedades mecánicas del 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

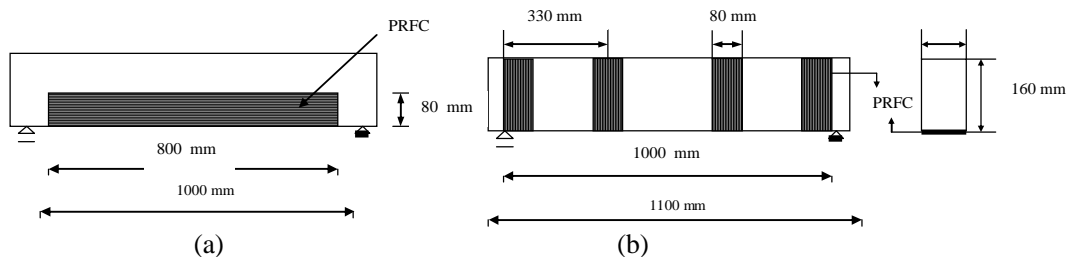


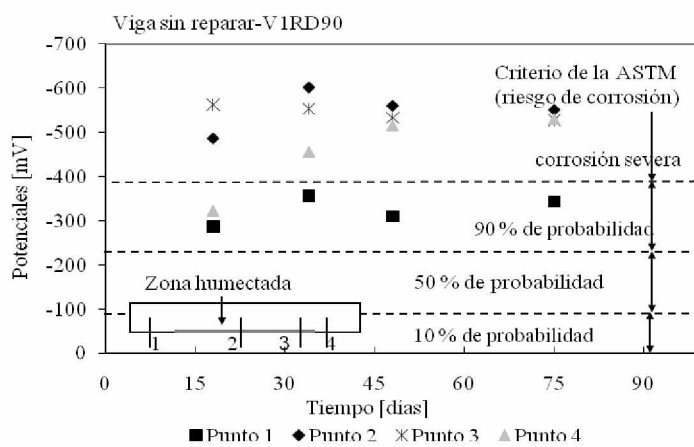
Figura 4: Esquemas de reparación con PRF: a) Envoltura en "U"; b) Esquema 2

3 RESULTADOS.

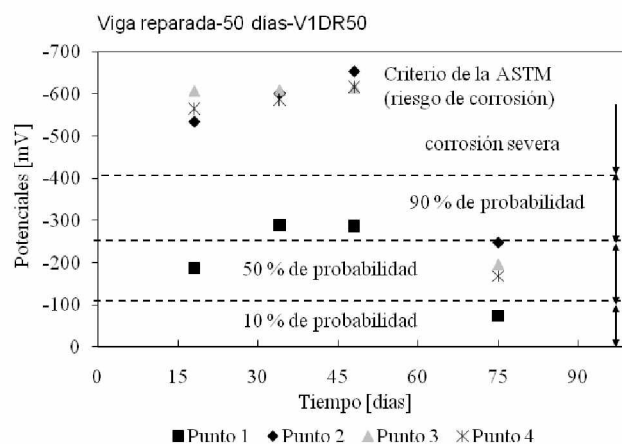
3.1 Proceso de corrosión acelerado

En la Figura 5 (a) y (b) se representan los valores de potencial electroquímico en función del tiempo, medidos en cuatro puntos de los especímenes V1RD90 (viga de referencia corroída durante 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 [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.



(a)



(b)

Figura 5: Medición de potenciales electroquímicos: (a) Viga sin reparar; (b) Viga dañada y reparada a los 50 días

En la Tabla 3 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. 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 3: 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	0.83	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	0.85	0.814
V3DR70	416.76	377.00	39.76	9.54	5098.50	0.52	0.814
V1DR90	416.76	323.94	92.82	22.27	11900	1.07	0.814
V2DR90	416.76	365.72	51.04	12.30	6546.15	0.49	0.814
V3DR90	416.76	364.35	52.41	12.60	6719	0.65	0.814

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

3.2 Tipos de falla

La viga de referencia, V1R, 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 esta rotura es provocada por la tensión generada en los extremos del refuerzo. En la Figura 6 se puede ver el tipo de falla de las vigas dañadas y reparadas según los dos esquemas de reparación adoptados.



Viga corroída y reparada



Viga corroída y reparada

Figura 6: Tipo de falla de vigas dañadas y reparadas con PRFC.

3.3 Diagramas carga-desplazamiento

En las Figura 7 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). Se muestra también la comparación con las vigas no reparadas, V1R (viga de referencia no corroída) y V1RD90 (viga de referencia corroída durante 90 días). 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).

Los valores de carga máxima de todas las vigas se muestran en la Tabla 4. 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 4 con los gráficos de la Figura 7.

Tabla 4: 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
V3DR90	39.00

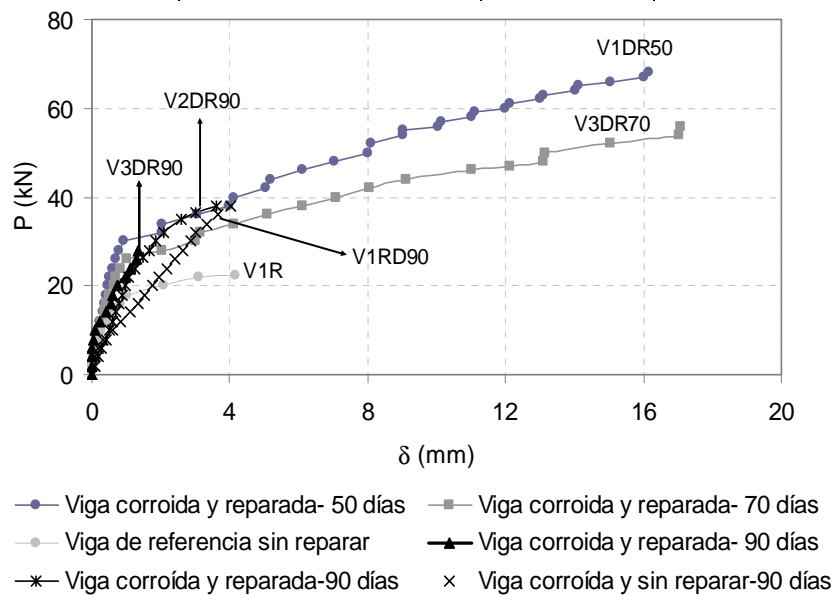


Figura 7. Curvas $P-\delta$ de vigas dañadas y reparadas. Comparación con vigas no reparadas.

4 CAPACIDAD RESISTENTE A CORTE. MODELOS EMPIRICOS. COMPARACION CON RESULTADOS EXPERIMENTALES.

4.1 Introducción

A continuación se presentan los valores de resistencia corte calculados según la norma ACI 440.2R-02 [7] y la formulación propuesta por de Li et al [8], para las vigas de hormigón armado dañadas por corrosión y reparadas con PRFC, 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.

4.2 Norma ACI 440.2R-02 [7]

Según esta norma, 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

considerando factores de reducción de tensiones.

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.

4.3 Modelo de Li et al [8]

Li et al [9] 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° con respecto al eje longitudinal de la viga

4.4 Comparación de modelos empíricos y experimentales

En la Tabla 5 se muestra la comparación de la carga última obtenida experimentalmente con los valores calculados a partir de la norma ACI

440.2R-02 [7] y la formulación de Li et al [8]. Se debe destacar que sólo figuran en Tabla los valores experimentales correspondientes a las vigas reparadas con el esquema de refuerzo tipo 2, Figura 4 (b).

Tabla 5: Comparación de valores de carga última, experimentales y empíricos, de vigas de hormigón dañadas y reparadas con PRFC

Espécimen	$P_{\text{última Exp.}}$ (kN)	$P_{\text{última ACI}}$ (kN)	$P_{\text{última Li et al [10]}}$ (kN)	$P_{\text{exp}}/P_{\text{ACI}}$	$P_{\text{exp}}/P_{[10]}$
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, calibrada con datos

experimentales propios, subestiman la eficiencia del refuerzo con PRF, resultando estimaciones conservadoras.

5 CONCLUSIONES.

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.

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.

6 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.

7 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] ACI 440.2R-02: **Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP System for Strengthening Concrete Structures**, (2002).
 [8] A. Li, Ch. Diagona and Y. Delmas: **Engineering Structures Vol 23**, (2001).

