

Revista Hormigón

Análisis del comportamiento de vigas de hormigón armado. Dañadas por corrosión y reparadas con polímeros reforzados con fibras

Autores

Schierloh M.I., Rougier V.C., Souchetti R.F.

Grupo de Investigación en Rehabilitación de Estructuras, Depto. de Ingeniería Civil, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional
Calle Ingeniero Pereira 676 (3264), Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Tel/fax: 03442 425541
schierlm@frcu.utn.edu.ar, rougierv@frcu.utn.edu.ar, souchetti@hotmail.com

Resumen

Las vigas de hormigón armado, son a menudo susceptibles a la corrosión de sus armaduras de acero. En numerosos casos los métodos de rehabilitación demostraron ser ineficientes para evitar que el proceso de corrosión continúe. Esto ha dejado expuesta la necesidad de mejorar la comprensión de la influencia del daño debido a la corrosión sobre el comportamiento estructural, así como también la necesidad de diseñar sistemas de reparación y/o refuerzo eficientes que reduzcan o retarden el proceso de corrosión del acero, aumentando la resistencia y ductilidad del elemento estructural y reduciendo la permeabilidad. Diversos trabajos de investigación demostraron que el uso de polímeros reforzados con fibras (PRF) representa una solución efectiva en la reparación de estructuras dañadas por corrosión.

En este trabajo se estudia el comportamiento a flexión de vigas de hormigón armado con sus armaduras afectadas por procesos corrosivos y reparadas con PRF. Para estudiar el funcionamiento de las reparaciones planteadas y evaluar su eficiencia, se analizan y comparan entre sí resultados experimentales.

Palabras-clave: Corrosión, Reparación, Polímeros reforzados con Fibras.

1. 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 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 las barras y el hormigón [1].

Para determinar el sistema de reparación y/o refuerzo más adecuado es necesario estimar la vida de servicio remanente de las estructuras de hormigón armado, cuando el deterioro ha progresado más allá del período inicial y la corrosión se ha propagado.

Los polímeros reforzados con fibras (PRF) se han convertido en los últimos años en una solución efectiva en la rehabilitación de estructuras dañadas por corrosión. Este concepto de reparación fue motivado por la observación de que los PRFs son químicamente inertes a los agentes que usualmente inducen la corrosión, además de otras ventajas, como su alta relación resistencia peso y su fácil montaje a elementos de hormigón [1].

En este trabajo se presentan los resultados de un estudio experimental llevado a cabo sobre vigas sometidas a un proceso acelerado de corrosión, reparadas con polímeros reforzados con fibras de carbono (PRFC) y luego ensayadas a flexión hasta rotura a los efectos de evaluar el comportamiento post-reparación.

2. Programa experimental

El programa propuesto incluye seis series de vigas cada una integrada por seis probetas con las siguientes características, sección: 8cm x 16cm y longitud de 110cm, armada con acero de diámetro 8mm, 6mm, y estribos de 4,2mm cada 13,25 cm; se usó un recubrimiento en todo su perímetro de 2 cm. En la Figura 1 se muestran los detalles de armadura y sección de las vigas. En el primer año se realizaron dos series (12 vigas), de un total de 36 vigas planificadas, además de las probetas de control (cilíndrica). Las cuales fueron afectadas mediante un proceso de corrosión acelerada y reparadas con PRFC. En el ensayo a flexión, las probetas se cargaron en sus tercios.

Para una mejor comprensión de los resultados se dividieron, el total de probetas, en cuatro grupos. El primero: de control, formado por aquellas muestras que no se corroen ni se repararan, a los efectos de servir como vigas de referencia en el programa, ensayándose a flexión. El segundo grupo, integrado por aquellas corroídas sin reparar, incluye probetas corroídas hasta los 90 días (patrones). El tercer grupo compuesto por aquellas que serán reparadas con PRF a corto plazo, a 30 y 50 días, continuando el proceso corrosivo hasta completar los 90 días de exposición y por último ensayadas a flexión. En el cuarto grupo se incluyen aquellas reparadas con PRF a mediano y largo plazo, las probetas serán reparadas a 70 y 90 días, en todos los casos se continua exponiendo a las probetas a corrosión inducida hasta completar los 90 días, al finalizar este período se ensayaron a flexión.

2.1 Propiedades de los materiales

2.1.1 Hormigón

Para comenzar los trabajos se calculó una dosificación racional, para obtener un hormigón tipo H-17 según CIRSOC 201:82 [1], para lo cual se utilizó la metodología propuesta por el Instituto de Cemento Portland (ICPA) [2]. En las dos primeras series se trabajó con cemento portland normal CPN 40 marca ANCAP, con relación a/c=0,53 y Asentamiento de 8 cm. Obteniéndose para un metro cúbico la dosificación que se muestra en Tabla 1.

El Hormigón se elaboró en una planta automatizada, única en la zona, la cual se muestra en la Figura 2, lo que permitió obtener hormigones con muy baja dispersión, del orden 5 MPa.

Se confeccionaron las probetas de control (cilíndricas) y vigas de hormigón armado, según norma IRAM 1534 [3] realizando la identificación de los diferentes grupos de muestras y curado de las mismas durante 28 días según las especificaciones de la norma IRAM 1534 [3].

2.1.2 Acero

Se empleo acero de Dureza Natural Acindar denominadas comercialmente DN A-42 de diámetro nominal 6mm y 8mm. Para los estribos se usó tipo T 500 de diámetro nominal 4,2mm. La designación **DN A-420®** corresponde al valor característico del límite de fluencia para barras según normas IRAM-IAS U 500-528. Las propiedades se muestran en la Tabla 2.

2.1.3 Polímero Reforzado con Fibras de Carbono (PRFC)

El refuerzo y/o reparación de las vigas 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.

2.2. Ensayos de Caracterización

Se realizaron ensayos de flexión sobre una de las vigas de cada serie, llamada de referencia, a los efectos de evaluar tipo de rotura y carga máxima alcanzada.

En la Tabla 3 se detallan las vigas ensayadas con su denominación y características.

Con el fin de obtener las propiedades mecánicas, resistencia última y módulo elástico, del hormigón se ensayaron probetas cilíndricas de 15 x 30 cm a compresión uniaxial, según normativa vigente en el país [3], [4] como se muestra en la Figura 4.

Las propiedades mecánicas del hormigón, de la armadura de acero y del PRFC se muestran en la Tabla 4. Las propiedades del material compuesto fueron proporcionadas por el fabricante.

2.3. Método acelerado de corrosión

Con el fin de acelerar el proceso de corrosión se aplicó una corriente externa constante a través de las armaduras, para hacerlas actuar como ánodo, mediante un galvanostato (Figura 1).

Se empleó una densidad de corriente $i_{corr} = 140 \text{ KA/cm}^2$, cabe señalar que Andrade et al. [5], informó que en ambientes muy agresivos, se han medido densidades de corriente de corrosión de aproximadamente 100-200 KA/cm². Por lo tanto, la densidad de corriente elegida fue similar a las medidas en campo. En el caso de las vigas aquí analizadas se aplicó una intensidad de corriente de 39,6 mA. Este valor se usó 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.

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 incluyen mediciones de potenciales electroquímicos con hemicelda de Cu-Sulfato de Cu (norma ASTM C 876-91 [6]). Y las destructivas, comprendieron la gravimetría de las barras corroídas, con lo cual se obtuvieron las pérdidas reales del material, las cuales se compararon con las teóricas calculadas utilizando la ley de Faraday como se explicita a continuación.

2.3.1. Gravimetría de las barras corroídas

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

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

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).

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 %.

2.4. Esquemas de reparación aplicados

Los métodos tradicionales usados comúnmente para el refuerzo y/o reparación a flexión de vigas de hormigón armado incluyen el post-tesado externo y la aplicación de planchuelas de acero. Estos métodos tienen desventajas que van desde la dificultad de aplicación hasta problemas de durabilidad. Por ello en los últimos años, la utilización de placas o laminados de PRFs como refuerzo externo a flexión de vigas de hormigón armado, surgió como una solución que ha dado muy buenos resultados.

La reparación y/o refuerzo a flexión de una viga de hormigón armado con PRFs se hace simplemente adhiriendo la placa o tejido de material compuesto a la parte inferior de la viga, donde se producirán los esfuerzos de tracción. Para ello la superficie del hormigón a reforzar debe estar convenientemente preparada, esto es libre de polvos, grasas e irregularidades. El refuerzo puede hacerse con placas prefabricadas o puede ser preparado in situ mediante el proceso denominado húmedo. En el primer caso las placas se cortan de acuerdo al tamaño requerido y se pegan a la parte inferior de la viga. Esta técnica asegura un mayor grado de uniformidad del material y control de calidad. El proceso húmedo es quizás el más utilizado y proporciona mayor flexibilidad. La resina se aplica a la superficie del hormigón mientras se impregnan las capas de tejido que luego son adheridas al elemento de hormigón mediante rodillos. Este último sistema fue el adoptado para reparar las vigas presentadas en este trabajo.

En la Figura 3 se puede ver el esquema de reparación inicialmente propuesto. Consistió en la aplicación de un tejido unidireccional de fibras de carbono de alto módulo y alta resistencia y resina epoxi. 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.

En la primera serie se repararon vigas a los 70 y a los 90 días de iniciado el proceso de corrosión acelerado. Los especímenes reparados a los 70 días continuaron con el proceso de corrosión hasta llegar 90 días, luego de lo cual las 4 vigas fueron ensayadas a flexión en cuatro puntos hasta la rotura. Se midieron cargas y desplazamientos del punto medio de cada viga.

También se ensayaron dos probetas sin reparar. Una de ellas fue ensayada al comienzo del programa experimental, sin ningún ataque de corrosión de sus armaduras, denominada VIR, y la otra a los 90 días sometida al proceso de corrosión acelerado y sin reparación, denominada VIRD90.

Luego de ensayada la primera serie 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, que 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 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 4 se muestra el nuevo esquema de reparación propuesto. El mismo consistió en colocar cuatro bandas de 80mm 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.

3. Resultados

Se observó que los valores de potenciales electroquímicos de corrosión disminuyeron en las vigas reparadas en el avance del proceso, respecto a la probeta sin reparar, Figuras 5 a 11. En cuanto a la pérdida de masa en las vigas reparadas después de 90 días de exposición a la corrosión, en la Tabla 5 se puede ver que las reparadas a 50 y 70 días perdieron en promedio aproximadamente el 5% menos de material que aquellas reparadas al finalizar el ciclo. El refuerzo de FRP envolvente, previsto para el fortalecimiento a flexión, en reparación a 90 días tuvo un efecto menor que en las vigas reparadas a 70 días, sobre la actividad de la corrosión. La reducción de la pérdida de masa en las probetas reparadas, puede atribuirse a la menor difusión de humedad y oxígeno que genera el envoltorio con FPRC. Conjuntamente la disminución en los valores de los potenciales electroquímicos de corrosión observadas en las probetas reparadas respecto de la sin reparar, estaría indicando una disminución en la actividad corrosiva, tendencia similar a la observada por otros autores [1].

La viga de referencia, V1R, no dañada por corrosión y sin reparar, tuvo un tipo de falla frágil y repentina, por corte. En la Tabla 6 se muestra el valor de carga máxima alcanzada.

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. La viga sometida al proceso de corrosión acelerada durante 90 días y no reparada, V1RD, mostró un tipo de falla más dúctil, falla por flexión, razón por la cual alcanzó un valor de carga prácticamente igual al de las vigas reparadas. En la Figura 14 se puede ver el tipo de falla de una viga dañada y reparada y de la viga de referencia, V1R.

En las Figuras 12 y 13 se presentan las curvas carga-desplazamiento ($P-\delta$) correspondientes a las vigas reparadas y ensayadas a los 90 días, denominadas V1DR70 y V2DR90 (vigas dañadas y reparadas a los 70 y 90 días). En la misma Figura se muestra también la comparación con las vigas no reparadas, V1R y V2RD. Se debe destacar que solamente se representan gráficamente los resultados correspondientes a una viga reparada a los 70 días (V1DR70) y una a los 90 (V2DR90), pues problemas en el sistema de medición de desplazamientos no permiten contar con los registros correspondientes a los otros dos especímenes. 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 Tabla con los gráficos de las Figuras 12 y 13.

4. Conclusiones

Este estudio revela en primer lugar, que los PRFs permiten mantener la integridad estructural de vigas de hormigón armado dañadas por corrosión. Si bien el tipo de falla, no se modifica, con respecto a una viga no dañada ni reparada, la reparación con PRFC permite aumentar la resistencia última a flexión. De todos modos es necesario realizar un mayor número de ensayos y analizar el comportamiento en servicio de las vigas reforzadas como así también del refuerzo, de un material con patologías intrínsecas, previendo además del refuerzo a flexión con PRFC, uno a corte mínimo, a los efectos de evitar la falla causada por este esfuerzo, que se produjo en los especímenes reparados.

5. 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 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.

6. Bibliografía

- [1] Masoud, S. y Soudky K., *Evaluation of corrosion activity in FRP repaired RC beams*, Cement & Concrete Composites, 28, 2006, pp.969-977.
- [2] Instituto del Cemento Portland Argentino, *Diseño Racional de Mezclas de Hormigón- Método ICPA*, 2000.
- [3] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, IRAM 1534, *Hormigón de cemento pórtland. Preparación y curado de probetas para ensayos en laboratorio*, 1985.
- [4] Instituto Argentino de Racionalización de Materiales, IRAM 1546, *Hormigón de cemento pórtland. Método de ensayo de compresión*, 1992.
- [5] Andrade C, Alonso C, Feliú S, González JA., *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.
- [6] American National Standard, ASTM C 876, *Standard Test Method for Half Cell Potential of Reinforcing Steel in Concrete*, 1991.

Tablas

Tabla 1. Dosificación para 1 m³ de Hormigón.

Cemento	325 kg
Agua	172 l
Arena	672 kg
Canto rodado	1248 kg
Totales	2417 kg

Tabla 2. Propiedades Mecánicas

Tracción

Valores	Limite de fluencia	Resistencia a la tracción	Alargamiento porcentual
	MPa	MPa	%
Característicos	420	500	12

Tabla 3: 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 afectada por corrosión durante 90 días y no reparada	Patrón
V1DR50	Viga afectada por corrosión durante 90 días y reparada a los 50 días	Reparadas a corto plazo
V1DR70	Viga afectada por corrosión durante 90 días y reparada a los 70 días	Reparadas a mediano y largo plazo
V2DR70	Viga afectada por corrosión durante 90 días y reparada a los 70 días	
V1DR90	Viga afectada por corrosión durante 90 días y reparada a los 90 días	
V2DR90	Viga afectada por corrosión durante 90 días y reparada a los 90 días	
V3DR70	Viga afectada por corrosión durante 90 días y reparada a los 70 días	
V2RD90	Viga afectada por corrosión durante 90 días y reparada a los 90 días	

Tabla 4: Propiedades mecánicas del hormigón, acero y PRFC.

Propiedades	Hormigón	Acero	PRFC
Resistencia característica compresión, σ_c (MPa)	30	-	-
Resistencia última a tracción, σ_{ut} (MPa)	-	500	960
Tensión de Fluencia, σ_f (MPa)	-	420	-
Módulo de Elasticidad E (MPa)	28000	210000	72500
Coefficiente de Poisson, ν	0.20	0.30	0.2
Espesor (mm)	-	-	1

Tabla 5: Resultados experimentales.

Espécimen	P_{rot} (kN)
V1R	29.00
V1RD90	39.10
V1DR70	37.80
V2DR70	39.42
V1DR90	40.90
V2DR90	39.70
V1DR50	68.00
V3DR70	56.00
V2RD90	22.50

Tabla 6: Resultado de las gravimetrías.

Viga N°	Tiempo (dias)	Peso inicial (grs)				Volumen inicial (mm3)	Peso final (grs)				Volumen final (mm3)	Perdida peso (grs)	Perdida Volumen (mm3)	Perdida teorica (mm3)	Rend. (%)
		Izq.	Der.	Estr.	Total		Izq.	Der.	Estr.	Total					
V1DR90	92	196,5	196,5	23,76	416,76	53430,7	148,29	158,3	17,35	323,94	41530,76	92,82	11900	10685	111
V1DR70	92	196,5	196,5	23,76	416,76	53430,7	150,3	156,52	15,74	322,56	41353,8	94,2	12076,9	10685	113
V2DR70	92	196,5	196,5	23,76	416,76	53430,7	158,67	170,38	15,12	344,17	44124,35	72,59	9306,4	10685	87
V1RD90	92	196,5	196,5	23,76	416,76	53430,7	176,92	180,79	16,65	374,36	47994,87	42,4	5435,9	10685	50,8
V1DR50	82	196,5	196,5	23,76	416,76	53430,7	168,07	157,18	21,57	346,82	44464	69,94	8966,6	9804	91,4
V3DR70	82	196,5	196,5	23,76	416,76	53430,7	181,86	172,7	22,5	377	48333	39,76	5098,5	9804	52
V2RD90	82	196,5	196,5	23,76	416,76	53430,7	169,01	175,71	21	365,72	46887	51,06	6546,15	9804	66,7
V2DR90	82	196,5	196,5	23,76	416,76	53430,7	171,88	170,32	22,15	364,35	46711	52,41	6719	9804	68,5