

Estudio del comportamiento mecánico y frente a corrosión de armaduras pasivas de acero revestidas con resina epoxi

Study of mechanical behaviour and durability of reinforcing bars fusion-bonded to an epoxy coating

Manuel Fernández-Cánovas⁽¹⁾, Jaime C. Gálvez⁽²⁾ y Patxi Goicolea Marin⁽³⁾

Recibido | Received: 12-03-2010
Aceptado | Accepted: 30-04-2010

Resumen

La Instrucción EHE-08 prevé una vida útil para las estructuras de hormigón armado habituales de 50 ó 100 años. En ambientes en los que el hormigón esté expuesto a la acción de cloruros el recubrimiento de la armadura necesario resulta excesivo, por lo que se recomienda el empleo de medidas especiales de protección de la armadura frente a corrosión. Una medida eficaz es el revestimiento de la armadura con resina epoxi. Esta solución plantea dos dudas: 1) la eficacia real de la protección frente a la corrosión, y 2) la posible alteración de la adherencia acero-hormigón. Este artículo presenta los resultados de los ensayos de corrosión acelerada y arrancamiento de barras ("pull-out") de estas barras y los compara con los obtenidos con barras iguales no revestidas. Se han ensayado barras de diámetros 8, 16 y 25 mm. Además, en los ensayos de corrosión acelerada, se ha estudiado la influencia de los defectos en la capa de resina epoxi, producidos por golpes en la superficie, así como la eficacia de la posible reparación en obra. Los resultados obtenidos muestran la gran eficacia de este tipo de protección frente a los ensayos de corrosión acelerada y la prácticamente nula influencia que tiene la capa de resina epoxi en los resultados de los ensayos de arrancamiento.

Palabras clave: corrosión, adherencia, durabilidad, epoxi, armadura, cloruro.

Abstract*

Spanish Concrete Instruction EHE-08 prescribes 50 and 100 years for the working life of the reinforced concrete structures. Chloride attack requires excessive thickness of the concrete cover and it is recommended alternative ways to protect the bars. To coat the bars with a fusion-bonded epoxy is a promising alternative. Two doubts are associated to this solution: 1) effectiveness of the epoxy coat against accelerated corrosion tests, and 2) alteration of the bond between reinforced bar and concrete in the pull-out test. This work presents the experimental results of accelerated corrosion and pull-out tests of reinforced bars coated fusion-bonded epoxy. The tests were performed with bars of 8, 16 and 25 mm diameter. Moreover, the influence of localized damage on the epoxy coated in the corrosion accelerated test was studied, and even the effectiveness of the in situ reparation. The results show a great effectiveness of the epoxy coat against the accelerated corrosion tests and practically null influence in the pull out results.

Keywords: corrosion, bond, durability, epoxy, reinforcement bar, chloride attack.

* An extensive English language summary of the present article is provided on page 110 of this issue both for the convenience of non-Spanish-speaking readers and inclusion in databases.

- (1) Dr. Ingeniero de Construcción. Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Madrid, España)
(2) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Madrid, España)
(3) Universidad Politécnica de Madrid, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos (Madrid, España)

Persona de contacto / Corresponding author: jaime.galvez@upm.es

1. INTRODUCCIÓN

La Instrucción EHE-08 [1] establece una vida útil de proyecto de 50 ó 100 años para las estructuras de hormigón armado habituales. En ambientes con cloruros (clases generales de exposición III y IV) en los que el proceso predominante de deterioro es por corrosión de la armadura, se deberían emplear recubrimientos de la armadura cuyo espesor es técnicamente inviable. En estos casos se deben adoptar medidas especiales de protección frente a la corrosión de la armadura. Además, la adopción de estas medidas permite disponer de un recubrimiento mínimo reducido para las clases generales de exposición III y IV. Entre los métodos de protección especial de la armadura cabe destacar [2, 3]:

- En el hormigón: aplicación de revestimientos superficiales y uso de inhibidores de corrosión (en masa o migratorios).
- En la armadura: uso de acero inoxidable, galvanizado de las barras, recubrimiento con resina epoxi, protección catódica.

El presente trabajo se centra en estudiar la eficacia de la protección de la armadura mediante el recubrimiento con resina epoxi. Este procedimiento de protección se empezó a usar hace más de 30 años en los Estados Unidos y Canadá [3], con la finalidad de frenar los efectos de la corrosión en tableros de puentes situados en ambientes agresivos y especialmente frente a las sales fundentes. Hace aproximadamente 20 años se promovió en Alemania el uso de recubrimientos de PVC para las barras de armar, en lugar de resinas epoxi [3]. El intento fracasó debido a la baja resistencia de estos revestimientos frente a los medios alcalinos y a su escasa adherencia al hormigón [3].

La eficacia de la protección de la resina epoxi frente a la corrosión se ha visto cuestionada por el deterioro que han sufrido algunas estructuras construidas en ambiente marino y en zonas con elevado uso de sales fundentes en los años 70 [4-6]. Sin embargo, el análisis de las barras corroídas ha mostrado deficiencias en la aplicación y adherencia de la capa de resina epoxi. Hoy día estas dificultades parecen completamente superadas [3, 7-9] y este tipo de protección se emplea, con resultados satisfactorios, cuando la agresividad del medio ambiente así lo aconseja. La Figura 1 muestra el empleo de este tipo de protección en el puente de los Dos Hermanos en la Bahía del Condado, en San Juan de Puerto Rico, actualmente en construcción.

Un aspecto importante a tratar es el posible detrimento de la adherencia acero-hormigón por la presencia de una capa intermedia, la resina epoxi, de propiedades mecánicas inferiores a las del acero y hormigón y mucho más deformable. ACI 318 [10] especifica una longitud de anclaje 1,20 veces superior a la correspondiente a la barra sin recubrimiento. Sin embargo, estu-



Figura 1. Barras corrugadas recubiertas de resina epoxi en el puente de los Dos Hermanos, San Juan de Puerto Rico

dios recientes muestran que espesores de la capa de resina epoxi de 200-300 micras no penalizan la adherencia [11, 12], y que sí lo hacen recubrimientos de espesor superior a 500 micras. Se acepta [13] que un recubrimiento de 200 micras alcanza un óptimo entre durabilidad y exigencias mecánicas, en particular de adherencia acero-hormigón. Algunos investigadores [3] proponen la adición de arena de sílice a la resina epoxi para incrementar, mediante rugosidad superficial, la adherencia con el hormigón.

El procedimiento de aplicación del recubrimiento de resina epoxi, las características mecánicas y químicas de la resina y el espesor mínimo están normalizados [14, 15].

En España apenas hay experiencia en el uso de la protección con resina epoxi de las barras de armadura del hormigón y, a pesar de los estudios arriba citados, aún hay dudas acerca de la eficacia de esta protección. De hecho la Instrucción EHE-08 [1] no la cita de forma explícita al enumerar las medidas especiales de protección de las armaduras frente a la corrosión (art. 37.2.4.1), mientras que por ejemplo ACI-318 [10] la contempla en el cálculo desde hace muchos años.

El recubrimiento de resina epoxi aísla y protege la barra del ambiente agresivo. La eficacia de la protección está relacionada con el espesor de la capa de resina. Un espesor inferior a 250 micras no garantiza una impermeabilidad completa frente al oxígeno y la humedad, aunque reduce de forma considerable su difusión si el espesor es mayor de 130 micras. La resina epoxi es muy impermeable a los iones de cloruro. Sin embargo, la resina epoxi es porosa por lo que se debe elegir un espesor de recubrimiento adecuado y cuidar su aplicación para evitar grietas y despegues [3].

El recubrimiento de resina epoxi muestra buena resistencia en los medios alcalinos y si está bien aplicada tiene una buena durabilidad. Los estudios realizados por la US Federal Highway Administration de Estados

Unidos [16, 17] han mostrado la eficacia de la protección de la armadura con resina epoxi en puentes con veinte años de antigüedad en zonas sometidas a un fuerte ataque por cloruros. No se ha documentado la eficacia de la protección en estructuras de edad superior, salvo los casos antes citados en los que había defectos de aplicación o construcción, probablemente por falta de experiencia previa.

Este artículo presenta los resultados de los ensayos de corrosión acelerada y arrancamiento de barras ("pull out") de estas barras y los compara con los obtenidos con barras iguales no revestidas. Se han ensayado barras de diámetros 8, 16 y 25 mm. Además, en los ensayos de corrosión acelerada, se ha estudiado la influencia de los defectos en la capa de resina epoxi, producidos por golpes en la superficie, así como la eficacia de la posible reparación en obra.

2. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

2.1. Material empleado

Se han ensayado barras corrugadas de acero B 500 SD, suministradas por un solo fabricante, con tres diámetros nominales: 8, 16 y 25 mm, cortadas a una longitud de 120 cm. El revestimiento de las barras empleadas en este estudio ha sido realizado por la compañía 3M con el producto fabricado por la misma Scotchkote® 413. Se trata de una resina sólida de color verde suministrada en polvo que debe ser aplicada por un aplicador autorizado.

La aplicación del producto Scotchkote® 413 se realiza por pulverización con carga electrostática. En el proceso de revestimiento se procede previamente a una limpieza del acero mediante granallado, para posteriormente calentar las barras a una temperatura aproximada de 230°C y aplicar mediante lluvia las partículas de polvo de resina epoxi cargado electrostáticamente sobre la superficie del acero. Las partículas del polvo se funden sobre la superficie para formar una película regular y uniforme. Una vez formada la misma, se procede a enfriar las barras de acero con agua. El resultado del citado proceso es un revestimiento uniforme libre de poros y grietas. La Figura 2 muestra una imagen de las barras de acero corrugado durante el proceso de aplicación de la resina epoxi.

Además de las barras revestidas de resina epoxi se han ensayado otras procedentes del mismo lote sin recubrimiento de resina epoxi.

2.2. Ensayos de caracterización de las barras

Estos ensayos tienen por finalidad determinar las propiedades mecánicas y geométricas de las barras ensayadas, tanto desnudas como revestidas de resina epoxi. Los ensayos realizados han sido de caracteriza-



Figura 2. Proceso de recubrimiento de las armaduras mediante aplicación de un spray cargado electrostáticamente

ción geométrica, de tracción, de doblado, y de medida del espesor del revestimiento de las barras.

Ensayos de caracterización geométrica

Tuvieron como objeto medir las características geométricas de las corrugas de las barras de acero: su altura, inclinación y separación o paso.

La altura máxima de corruga transversal se ha determinado como la diferencia entre el diámetro de la barra en el punto más alto de la corruga y el diámetro en la base de la misma. Los resultados del ensayo para cada barra son la media ponderada de 3 determinaciones.

La determinación de la inclinación de las corrugas, así como el paso entre ellas, se ha realizado con un proyector de perfiles marca *Mitotuyo*, dotado con dos micrómetros con una resolución de 0,005 mm. Se han ensayado secciones de una longitud de 50 mm para los tres diámetros de barra: 8, 16 y 25 mm. La determinación se ha realizado en las barras revestidas con epoxi y en las barras sin revestir.

El paso se ha determinado como la distancia entre dos puntos homólogos de dos corrugas consecutivas de igual inclinación.

La separación entre corrugas ha sido determinada como la distancia mínima entre dos corrugas consecutivas.

Como ángulo de inclinación de las corrugas se ha tomado la media de las medidas entre tres corrugas consecutivas de igual inclinación.

Ensayos de tracción

Los ensayos de tracción se han realizado siguiendo la norma UNE-EN ISO 15630-1. Se han llevado a cabo en una máquina servo-controlada de 2.000 KN de capacidad, de clase I. La medida de la deformación se ha reali-

zado con un extensómetro sobre una base de medida de 100 ó 200 mm, según el diámetro de la barra. Los datos de los ensayos se han registrado automáticamente con un programa informático.

Para cada uno de los diámetros de las barras se han ensayado cuatro barras: dos sin protección y otras dos con revestimiento epoxi.

Ensayos de doblado

Los ensayos de doblado se han realizado para analizar el comportamiento frente a fisuración del acero y del revestimiento epoxi, al aplicar a las barras un doblado de 180 grados. Los ensayos se han efectuado siguiendo la norma UNE-EN ISO 15630-1 y la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08 [1].

El ensayo se ha realizado en una máquina de doblado-desdoblado, realizando un doblado de 180°, lo que es equivalente a una prueba de doblado-desdoblado.

El diámetro de los mandriles ha sido de $3d$ para diámetros de barra menores de 16 mm y de $6d$ para las barras de diámetro superior a 16 mm, siendo d el diámetro de la barra. Los diámetros de mandriles resultantes para las barras de 8, 16 y 25 mm fueron respectivamente de 24, 48 y 150 mm. Se ensayaron cuatro barras de cada diámetro: dos sin protección y otras dos con revestimiento epoxi.

Medida del espesor del revestimiento epoxi de las barras

Las medidas del espesor del revestimiento epoxi se realizaron sobre las secciones transversales cortadas de tres barras elegidas al azar, una para cada diámetro. Se utilizó un proyector de perfiles de la marca *Nikon*, modelo V12-B, con una precisión de 0,001mm.

Los cortes se realizaron con una sierra mecánica refrigerada y se midió el espesor del recubrimiento en 4 puntos equidistantes de la sección.

2.3. Ensayos de corrosión acelerada

Los ensayos de corrosión acelerada han tenido como objetivo estudiar el comportamiento de las barras revestidas de epoxi en un ambiente fuertemente corrosivo. La aceleración del proceso corrosivo se realizó por dos vías consecutivas: la primera añadiendo cloruro de calcio al hormigón durante el amasado del mismo a fin de incrementar el número de iones cloruro presentes, y la segunda mediante la aplicación de una diferencia de potencial de corriente continua que polarice de forma positiva a las barras de acero.

Para poder realizar comparaciones de la protección que ofrece frente a la corrosión el revestimiento de epoxi a las barras de acero con relación a las no revestidas, se fabri-

caron placas de hormigón en las que se embebieron barras desnudas, barras revestidas de epoxi, barras revestidas de epoxi a las que se habían practicado daños superficiales sobre la capa de protección y posteriormente se habían reparado con una pintura epoxi y barras con iguales daños superficiales pero sin reparar. Todas las barras estuvieron durante el ensayo sometidas a la misma diferencia de potencial, situadas equidistantemente, con lo que se aseguraban las mismas condiciones agresivas en ellas para su posterior comparación. Se fabricaron dos tipos de placas para cada diámetro de barra. Uno para seis barras y otro para cuatro barras.

Los moldes utilizados para confeccionar las placas de hormigón se construyeron con madera de pino, teniendo una longitud de 60 cm, una altura de 12,5 cm y una anchura variable de acuerdo con el número, diámetro y separación de las barras a ensayar. Tanto la cara anterior como la posterior de los moldes disponían de orificios de diámetro ligeramente superior al de las barras a fin de posicionarlas dentro de los mismos.

En los moldes de seis barras y para el mismo diámetro, se colocaron equidistantes dos barras desnudas, dos barras revestidas de epoxi y dos barras revestidas de epoxi a las que se les habían practicado daños superficiales en la capa de protección y posteriormente se habían reparado manualmente con resina epoxi Scotchkote® 413. En los moldes de cuatro barras y para cada diámetro, se colocaron equidistantes dos barras no revestidas de epoxi y dos barras revestidas de epoxi a las que se les habían practicado daños superficiales en la capa de protección y que no se repararon. En una de las dos barras revestidas de 8 mm de diámetro, se realizó intencionadamente un corte lineal de la capa de resina de unos 15 cm de longitud por medio de un puntero, no procediendo a su reparación a fin de observar el comportamiento del mismo después del ensayo.

La posición de las zonas dañadas en las barras se registró y fotografió para la posterior localización y evaluación de la corrosión después del ensayo.

Todas las barras tenían una longitud total de 80 cm, quedando embebidos en el hormigón 60 cm. Los 10 cm de cada barra que sobresalían por cada lado del molde fueron utilizados para las conexiones eléctricas.

El hormigón diseñado para las placas tenía una resistencia media de 25 N/mm² a los 28 días, determinada en probetas cilíndricas de 15x30 cm, y una consistencia líquida conseguida mediante un aditivo superplastificante. Al hormigón se le añadió cloruro cálcico a fin de obtener un 4% de iones cloruro que facilitasen el proceso de la corrosión. La dosificación por metro cúbico de hormigón se detalla en la Tabla 1.

El hormigón fue amasado en una amasadora planetaria de eje vertical de 100 l de capacidad.

Después de aplicar a los moldes dos manos de desencofrado se procedió al hormigonado y compactación del hormigón enrasándose la superficie superior con una

Tabla 1. Dosificación del hormigón de las placas de ensayo de corrosión (por m³ de hormigón)

Componente	Contenido
Cemento CEM II/A-V 42.5R	350 kg
Arido fino (0-4 mm)	890 kg
Arido grueso (4-20 mm)	1.000 kg
Agua	150 kg
CaCl ₂	2,81 kg
Superplastificante (Viscocrete 3425)	4,20 kg

regla metálica. Posteriormente se cubrieron con una tela de arpillera húmeda para curar al hormigón. El desmoldeo se realizó a las 24 horas manteniendo la protección de la arpillera húmeda hasta la edad de 28 días. A partir de esta edad se comenzó a aplicar la corriente eléctrica.

Cada placa fue conectada a una fuente de alimentación que suministraba una corriente continua, conectando el polo positivo a las barras de acero, y el polo negativo a una placa de plomo de las mismas dimensiones de la placa de hormigón, situada sobre una bayeta que se humedecía diariamente y que cubría totalmente la superficie del hormigón. Cada dos días se hicieron medidas tanto de intensidad como de diferencia de potencial de la corriente suministrada. Con esto se conseguía controlar que las fuentes de alimentación suministrasen una misma densidad de corriente de aproximadamente 70 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ para los distintos diámetros de las barras.

El ensayo tuvo una duración de 110 días, al cabo de los cuales las placas fueron destruidas a fin de extraer las barras para examinar su estado de corrosión.

2.4. Ensayos de adherencia (pull-out)

Los ensayos realizados fueron de arrancamiento (pull-out) siguiendo las recomendaciones RC 6 "Bond for Reinforcement Steel 2. Pull-out test" de RILEM.

Las barras de acero a ensayar se hormigonaron en bloques de hormigón de 25x25x25 cm³ para las barras de

Tabla 2. Dosificación del hormigón de los bloques de anclaje en el ensayo de arrancamiento (por m³ de hormigón)

Componente	Contenido
Cemento CEM II/A-V 42.5R	350 kg
Arido fino (0-4 mm)	890 kg
Arido grueso (4-20 mm)	1.000 kg
Agua	140 kg
Superplastificante (Viscocrete 3425)	4,55 kg

25 mm de diámetro, y de 20x20x20 cm³ para las barras de 16 mm y 8 mm de diámetro. La longitud adherente fue en todos los casos de 5 veces el diámetro de cada barra, quedando parte de la barra fuera del bloque de hormigón. La tracción ejercida en el ensayo se efectuó desde el lado no adherido de la barra de acero, y los desplazamientos se midieron en el extremo adherido de la misma. La Tabla 2 detalla la dosificación del hormigón empleado en la confección de los bloques de anclaje.

Para la determinación de la resistencia a compresión del hormigón a 7 y 28 días se confeccionaron probetas cilíndricas de 15x30 cm que se ensayaron hasta rotura en una prensa Ibertest de 1.500 kN de capacidad.

Los ensayos de arrancamiento (pull-out) fueron realizados en una máquina servo-controlada de 2.000 KN de capacidad, de clase I. El desplazamiento relativo de la barra con respecto al bloque fue medido con un captador inductivo de desplazamiento de 40 mm de carrera. La velocidad de desplazamiento del pistón de la máquina era de 0,1 mm/s.

3. RESULTADOS

3.1 Resultados de los ensayos de caracterización de las barras

Ensayos de caracterización geométrica

Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 3.

Tabla 3. Características geométricas de las barras corrugadas

Diametro barra (mm)	Designación barra	Inclinación de corrugas (grados)	Paso (P) entre corrugas de igual inclinación (mm)	Distancia (p) entre corrugas de distinta inclinación (mm)	Altura máxima (a_m) media de corrugas (mm)
25	S.R.E.*	40 y 60	34,2	17,1	2,02
	C.R.E.**				2,65
16	S.R.E.*		21,0	10,5	1,20
	C.R.E.**				1,41
8	S.R.E.*		6,7	6,7	0,45
	C.R.E.**				0,46

* Sin revestimiento epoxi. ** Con revestimiento epoxi

Tabla 4. Resultados de los ensayos de tracción de las barras corrugadas

Diámetro (mm)	Designación	Sección (mm ²)	Resistencia a tracción R_m (N/mm ²)	Alargamiento de rotura A (%)
25	S.R.E.1*	490,87	672,7	20,0
	S.R.E.2*		690,1	20,4
	C.R.E.1**		679,6	20,0
	C.R.E.2**		674,3	20,0
16	S.R.E.1*	201,06	677,4	21,0
	S.R.E.2*		680,6	21,0
	C.R.E.1**		685,6	20,4
	C.R.E.2**		676,7	21,0
8	S.R.E.1*	50,26	861,0	20,0
	S.R.E.2*		839,5	20,0
	C.R.E.1**		836,0	20,0
	C.R.E.2**		866,0	20,0

* Sin revestimiento epoxi. ** Con revestimiento epoxi

Ensayos de tracción

Los resultados obtenidos se recogen en la Tabla 4.

La Figura 3 muestra una barra de diámetro 25 mm revestida con resina epoxi durante el ensayo. La Figura 4 muestra las barras con y sin resina epoxi tras el ensayo.



Figura 3. Detalle del extensómetro empleado en el ensayo de tracción de una barra de diámetro 25 mm revestida con resina epoxi



Figura 4. Barras tras el ensayo de tracción

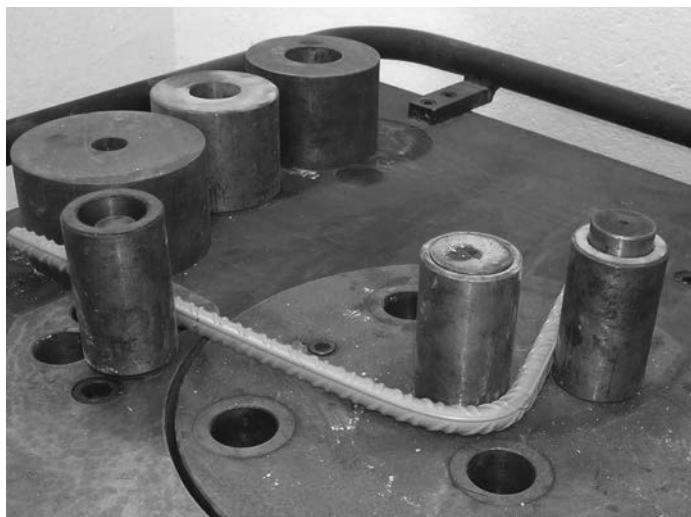
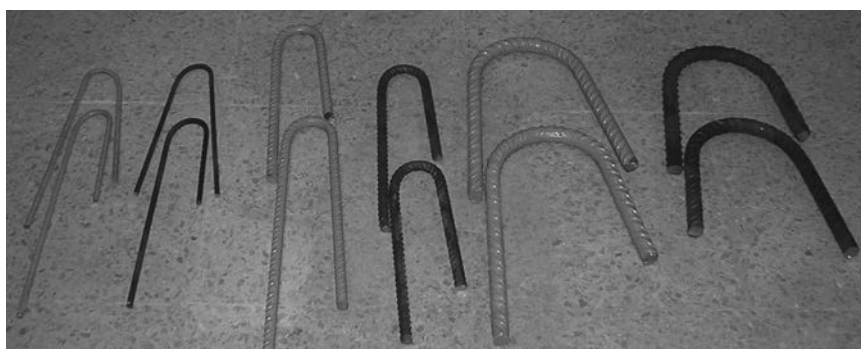


Figura 5. Barra revestida con resina epoxi durante el ensayo de doblado

Ensayos de doblado

Los resultados obtenidos del ensayo de doblado a 180° muestran que la película de resina epoxi de recubrimiento no ha sufrido ninguna alteración, rotura o fisuración, permaneciendo adherida al acero y en perfecto estado. La Figura 5 muestra una barra durante el ensayo de doblado. La Figura 6 muestra barras de los tres diámetros, tras el ensayo de doblado a 180°, en las que no se aprecian daños en el revestimiento de la resina epoxi



Medidas del espesor del revestimiento de las barras

Los puntos en los que se ha medido la altura del espesor de la capa de revestimiento han sido cuatro separados perimétricamente a 90 grados tal como aparecen indicados en la Figura 7.

La Tabla 5 recoge los resultados de los espesores del recubrimiento medidos en las barras recubiertas de resina epoxi.

Figura 6. Barras de los tres diámetros tras el ensayo de doblado a 180°. No se aprecian daños en el revestimiento de resina epoxi

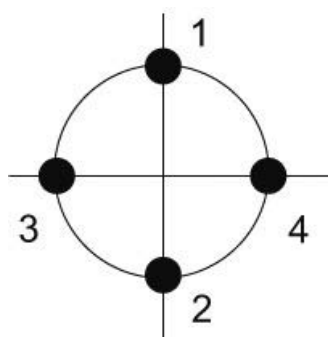


Figura 7. Esquema de los puntos de medida del espesor de resina en la sección transversal de la barra

Tabla 5. Resultados de la medida del espesor de la capa de revestimiento en las distintas barras

Diámetro (mm)	Punto	Espesor (mm)	Espesor medio (mm)
8	1	0,243	0,252
	2	0,321	
	3	0,165	
	4	0,280	
16	1	0,234	0,286
	2	0,247	
	3	0,374	
	4	0,287	
25	1	0,332	0,280
	2	0,233	
	3	0,262	
	4	0,291	

La Figura 8 muestra la medida del espesor del recubrimiento de resina epoxi con un proyector de perfiles. La Figura 9 muestra las porciones de barra cortadas con disco refrigerado para la medida del espesor de la capa de resina epoxi.

3.2. Resultados de los ensayos de corrosión acelerada

Los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión del hormigón utilizado en las placas, realizados sobre las probetas cilíndricas de 15x30 cm se recogen en la Tabla 6.

La corriente continua suministrada a cada barra ensayada es diferente de acuerdo con su diámetro a fin de obtener la misma densidad de corriente en todas ellas. La corriente se ha transmitido durante 110 días, lo que equivale, aproximadamente, a $9,5 \times 10^6$ segundos. Los valores de las corrientes aplicadas al conjunto de las barras han sido los indicados en la Tabla 7.

Tabla 6. Resistencia a compresión del hormigón de las placas de ensayo de corrosión

Resistencia a compresión (N/mm ²)	Edad (días)	
	7	28
Individual	23,1 22,9	27,6 28,5
Media	23,0	28,1

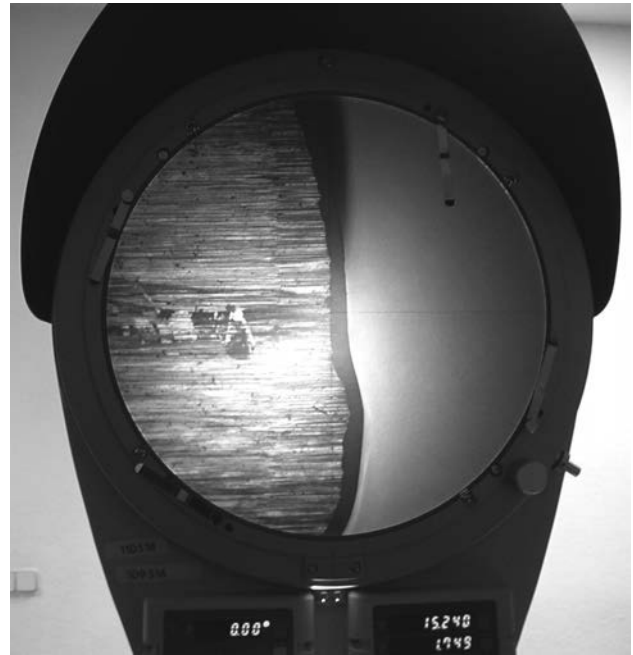


Figura 8. Medida del espesor de revestimiento de resina epoxi con un proyector de perfiles

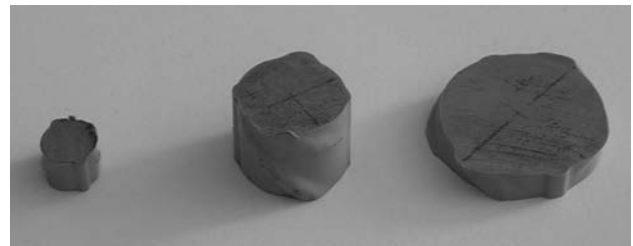


Figura 9. Porciones de barra cortadas con disco refrigerado para la medida del espesor de la capa de resina epoxi

Tabla 7. Valores de la densidad y cantidad de corriente eléctrica aplicadas a las barras

Diámetro barra, d (mm)	Superficie, S (mm ²)	Intensidad, I (amp)	Densidad de corriente, I/S (amp/cm ²)	Tiempo, t (s)	Cantidad de corriente, q (culombios)
25	47.120	0,030	$6,37 \times 10^{-5}$	$9,504 \times 10^6$	228×10^3
16	30.160	0,020	$6,63 \times 10^{-5}$	$9,504 \times 10^6$	190×10^3
8	15.080	0,010	$6,63 \times 10^{-5}$	$9,504 \times 10^6$	95×10^3

Tras los ensayos, las barras no revestidas de epoxi presentaron signos de corrosión generalizada avanzada y de corrosión por picadura, mientras que las barras revestidas con epoxi se encontraron en el mismo estado que antes de realizar el ensayo, estando totalmente limpias de corrosión. Las barras en las que se produjeron daños localizados y fueron posteriormente reparados tampoco presentaron signo alguno de corrosión y estaban totalmente limpias. Solamente las barras con daños no reparados presentaban en las zonas dañadas ligeras manchas de corrosión.

La Figura 10 muestra una visión general de las placas del ensayo de corrosión acelerada. La Figura 11 mues-

tra un detalle de la grieta generada en la losa por la corrosión de la armadura.

La Figura 12 muestra el tipo de daño introducido en la capa de resina epoxi. En la Figura 13 pueden observarse todas las barras de un mismo diámetro después del ensayo. En esta Figura se observa el fuerte deterioro por corrosión de la armadura y el perfecto estado de las barras recubierta de resina epoxi, incluidas las dañadas y reparadas.

Posteriormente al ensayo, se procedió a cortar los extremos de las barras que no estaban embebidos en el hormigón a fin de tener sólo la parte de la barra corroída.



Figura 10. Vista general del ensayo de corrosión acelerada

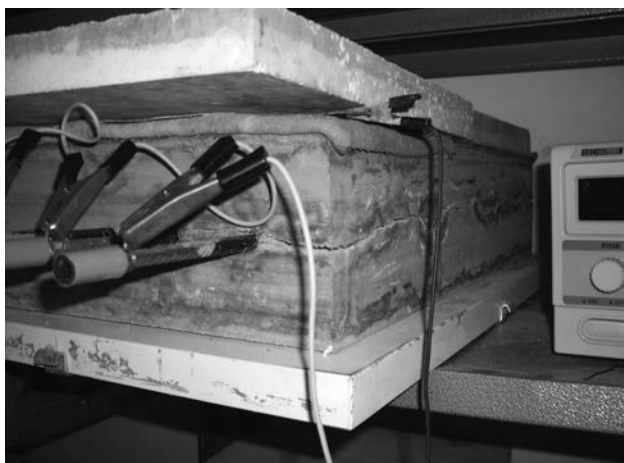


Figura 11. Grieta en la losa durante el ensayo de corrosión acelerada

Se eliminó la capa de herrumbre con un cepillo de alambre para poder determinar la pérdida en peso y la correspondiente pérdida de sección de cada barra. Estos valores se representan en la Tabla 8.

En las barras revestidas con epoxi, dañadas puntualmente y posteriormente reparadas, no se presentaba

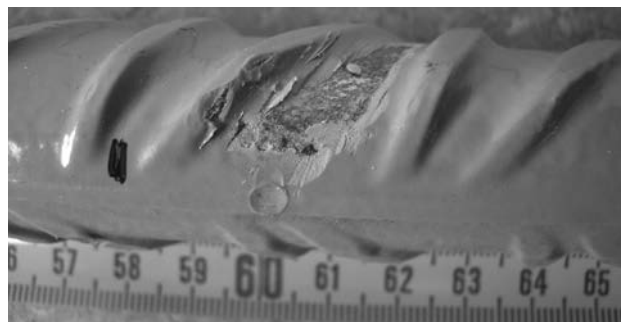


Figura 12. Daño introducido en la barra

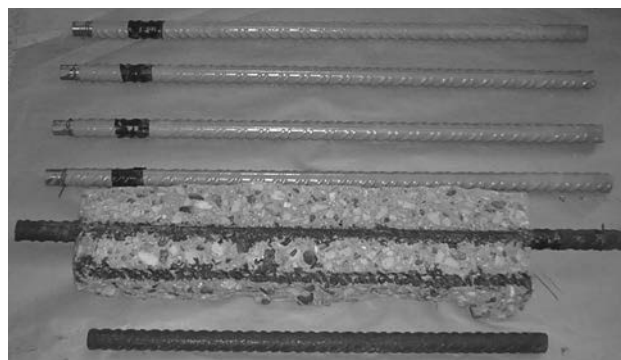


Figura 13. Estado de las seis barras tras el ensayo de corrosión acelerada en la losa con barras de diámetro 25 mm

ninguna pérdida de sección ni de peso al no haberse producido corrosión alguna.

En las barras revestidas y con daños puntuales que no habían sido reparados aparecieron en estos puntos manchas de óxido superficial y sin picadura del acero y que no afectaban significativamente a la sección del acero, manteniéndose el revestimiento totalmente adherido. La barra de 8 mm de diámetro, en la que se le había producido un corte longitudinal del revestimiento de aproximadamente 150 mm de longitud, apareció una zona con corrosión generalizada de 4 mm de ancho y longitud similar a la del daño producido y sin corrosión por picadura (Figura 14). En esta zona se cortó un

Tabla 8. Pérdida de sección en las barras no revestidas con resina epoxi provocada por la corrosión

Diámetro barra, d (mm)	Peso al iniciar el ensayo, p_1 (g)	Peso al finalizar el ensayo, p_2 (g)	Pérdida de peso, p_1-p_2 (g)	Pérdida de peso o sección, $(p_1-p_2)/p_1$ (%)
25	2.299	2.249	69	3,0
16	929	881	46	5,3
8	237	214	23	9,7

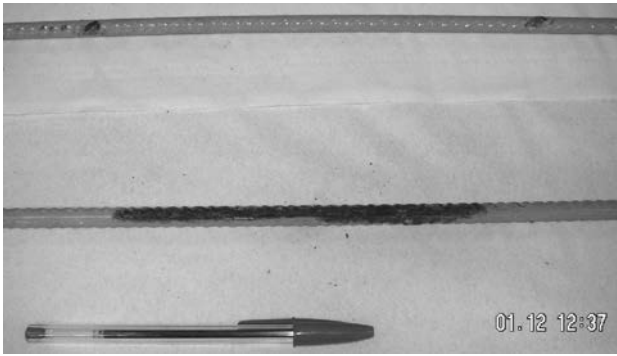


Figura 14. Corrosión en una barra recubierta con resina epoxi en la que se introdujo un corte longitudinal en la resina de aproximadamente 150 mm

Tabla 9. Resistencia a compresión del hormigón de los bloques de anclaje en los ensayos de arrancamiento (pull-out)

Resistencia a compresión (N/mm ²)	Edad (días)	
	7	28
Individual	26,9 21,9	38,9 37,8
Media	24,4	38,4

trozo de barra de 1 cm de longitud y se midió la pérdida de sección que fue de 1,08 %.

3.3. Resultados de los ensayos de adherencia

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión del hormigón utilizado para los bloques son los indicados en la Tabla 9.

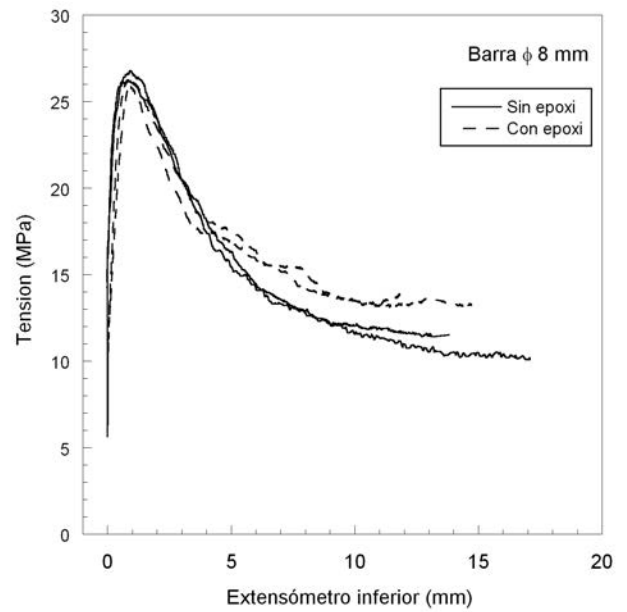
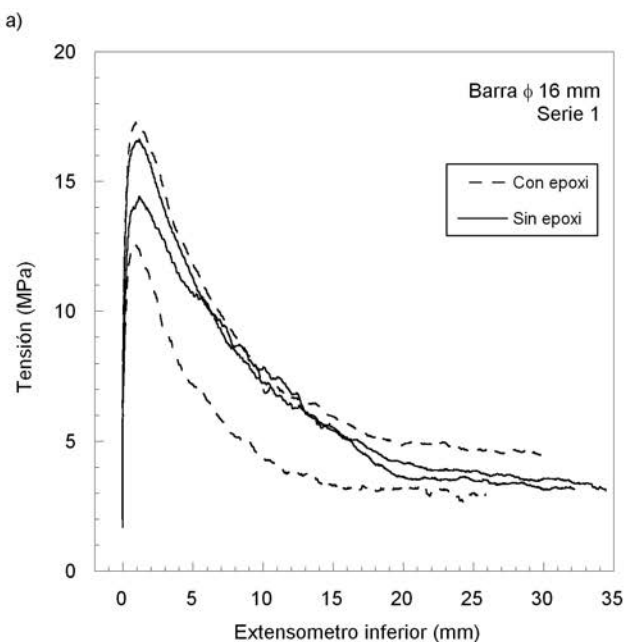


Figura 15. Curvas experimentales tensión de adherencia-deslizamiento en las probetas con barras de 8 mm de diámetro

Las Figuras 15, 16 y 17 muestran las curvas experimentales de tensión de adherencia-deslizamiento en las probetas con barras de 8, 16 y 25 mm de diámetro respectivamente. El deslizamiento representado corresponde al medido en el extremo libre de la barra. En el caso de las barras con diámetros de 16 y 25 mm se ensayaron dos series. En el caso de las probetas con diámetro 25 mm, en la segunda serie de ensayos (Figura 17 b) el fallo se produjo por rotura del bloque de anclaje de la barra, lo que sugiere que el cubo de hormigón de 25x25x25 cm³ resulta de dimensiones insuficientes para garantizar el fallo por arrancamiento de la barra.

La Tabla 10 muestra los valores de las tensiones de adherencia máximos alcanzados para cada una de las

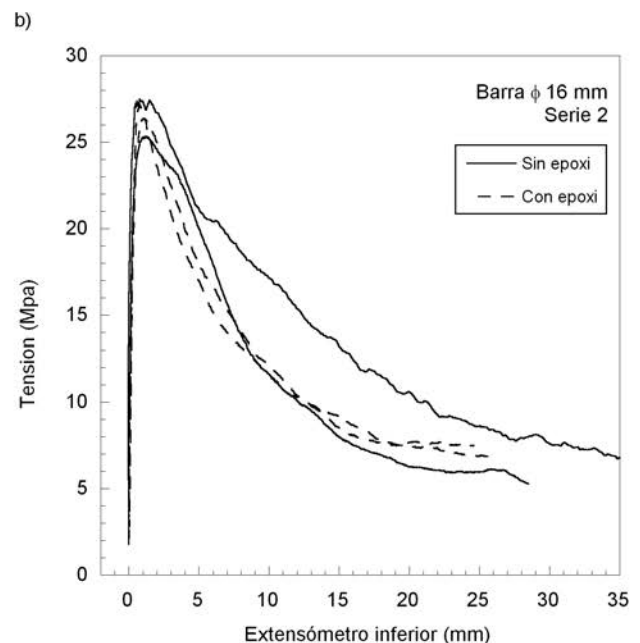


Figura 16. Curvas experimentales tensión de adherencia-deslizamiento en las probetas con barras de 16 mm de diámetro

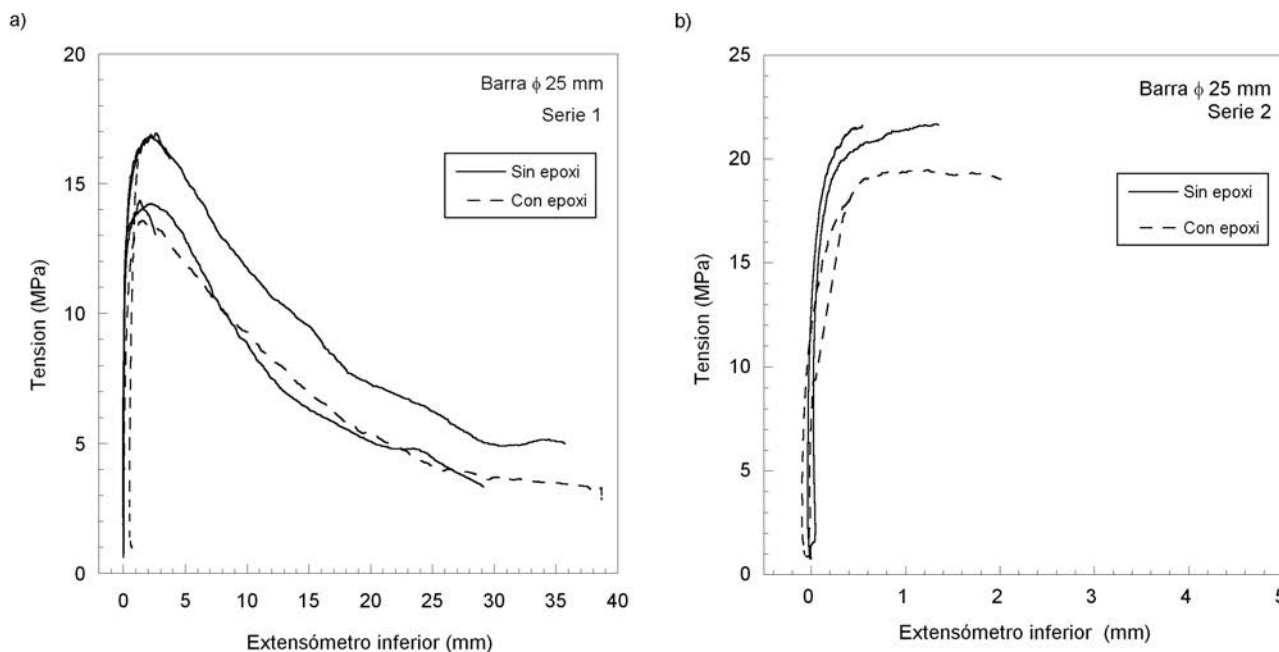


Figura 17. Curvas experimentales tensión de adherencia-deslizamiento en las probetas con barras de 25 mm de diámetro

Tabla 10. Resultados de los ensayos de arrancamiento (pull-out) de las barras corrugadas

Diámetro (mm)	Designación	Serie	Carga máxima, P (kN)	Tensión máxima, $\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\tau_{m\acute{a}x}$ (MPa)	$\Delta\tau_{m\acute{a}x}$ (%)	
8	S.R.E.*	1	28,81	28,66	28,81	-2,53	
			29,11	28,96			
	C.R.E.**		28,03	27,88	28,08		
			28,42	28,27			
16	S.R.E.*	1	65,95	16,40	16,51	-6,06	
			68,80	17,11			
			60,86	15,13			
			69,87	17,38			
	C.R.E.**	1	53,02	13,18	15,51		
			70,85	17,62			
			52,72	13,11			
			72,91	18,13			
	S.R.E.*	2	114,76	28,54	27,51		1,81
			106,43	26,47			
C.R.E.**	2	114,27	28,42	28,01			
		111,03	27,61				
25	S.R.E.*	1	144,55	14,72	17,00	-9,65	
			170,72	17,39			
			145,14	14,78			
			171,80	17,50			
	C.R.E.**	1	139,36	14,20	15,36		
			162,19	16,52			
	S.R.E.*	2	218,34	22,24	22,33		-13,17
			220,21	22,43			
	C.R.E.**	2	197,67	20,13	19,39		
			183,06	18,64			

* Sin revestimiento epoxi. ** Con revestimiento epoxi

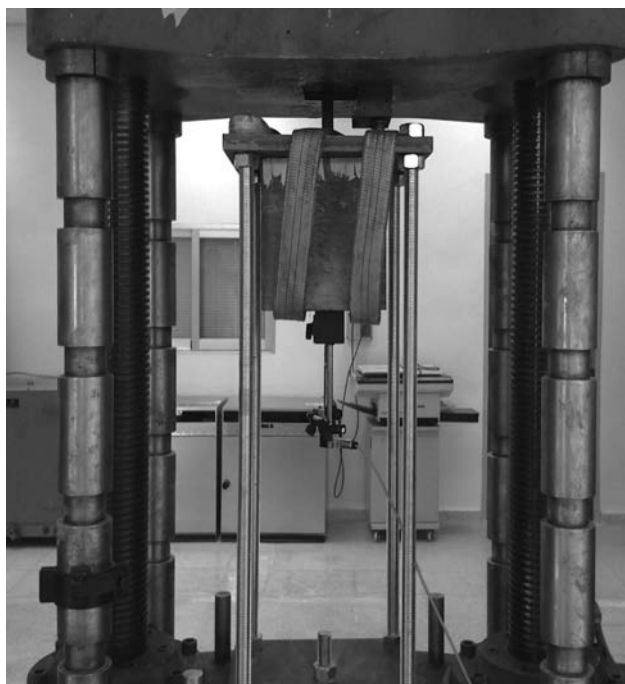


Figura 18. Vista general del ensayo de arrancamiento (pull-out)



Figura 19. Estado superficial de una barra revestida de resina después del ensayo de arrancamiento

barras ensayadas. El valor medio de la disminución de la tensión de adherencia máxima de las barras recubiertas de resina epoxi frente a las barras sin recubrir, ha sido del 5,9 %

La Figura 18 muestra una probeta durante el ensayo y la Figura 19 una imagen del estado superficial de la resina epoxi tras el ensayo de arrancamiento.

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

4.1. Ensayos de corrosión acelerada

Los resultados de los ensayos de corrosión acelerada llevados a cabo, demuestran claramente la efectiva protección del revestimiento de resina epoxi frente al proceso de corrosión del acero. La comparación establecida en los ensayos entre las barras con revestimiento epoxi y sin él, demuestra que, frente a unas mismas condiciones de fuerte agresividad, en las barras desprotegidas se presentan signos de una elevada corrosión, mientras que las barras revestidas de epoxi están en perfecto estado habiendo resistido el ensayo sin signo de corrosión alguna.

Las barras sobre las que se habían producido daños puntuales localizados y habían sido posteriormente reparadas con epoxi tampoco han sufrido corrosión alguna. Esto indica la validez y eficacia de las reparaciones manuales efectuadas en obra sobre las barras de la armadura cuyo recubrimiento ha podido ser dañado durante su manejo o almacenamiento.

Las barras sobre las que se habían producido daños puntuales localizados y no habían sido reparados han

mostrado manchas de corrosión en la superficie de epoxi donde estaban situados dichos daños pero que no han afectado a la integridad de la barra y sí, únicamente, han dado lugar a una ligera corrosión generalizada sin picaduras en una zona de 2 a 4 mm². Solamente en una de las barras de 8 mm de diámetro, en la que se había producido un corte longitudinal de la capa de epoxi de unos 150 mm, se aprecia un desprendimiento de la capa de epoxi de unos 160 mm de longitud y 4 mm de ancho y en la que el acero aparece con una ligera capa corroída, no observándose picaduras y habiéndose medido una pérdida de sección de 1,08 % lo que es equivalente a aproximadamente el 11% de la pérdida que sufre la misma barra sin revestimiento sometida a la misma cantidad de corriente.

Los resultados obtenidos de pérdida de peso y sección son similares para los distintos diámetros de barras, si bien, como es lógico, cuando las barras son de menor diámetro la pérdida de sección se va haciendo mayor. Esto se produce gracias al control continuo que se llevó a cabo sobre la intensidad de corriente y la diferencia de tensión sobre los circuitos de cada una de las placas ensayadas.

4.2. Ensayos de adherencia

Los ensayos de arrancamiento (pull-out) para evaluar la adherencia, llevados a cabo sobre las diferentes barras, muestran una capacidad adherente muy similar entre las barras revestidas de epoxi y las desnudas. Como se puede apreciar en las Figuras 15 y 16 y en la Tabla 10, la disminución de la tensión máxima de adherencia es pequeña, del orden de 2,5 % para las barras de diámetros 8 y 16 mm. En las Figuras tampoco se aprecian mayores

deslizamientos al alcanzar la carga máxima. Igualmente, las tensiones residuales de las barras revestidas son superiores a las alcanzadas sobre las barras sin revestimiento, así como la pendiente de descarga de las barras revestidas es más suave que las barras de acero desnudas.

En el caso de las barras con diámetro 25 mm, Figura 17, la pérdida aparente de adherencia es mayor, pero como se ha indicado, el fallo se produce por rotura del bloque de anclaje y no por arrancamiento de la barra, por lo que estos valores se deben tomar con precaución. Parece conveniente aumentar el tamaño del bloque de anclaje respecto a lo recomendado por RC6 de RILEM.

Los resultados obtenidos en este trabajo no coinciden con los obtenidos en ensayos similares realizados anteriormente con otros tratamientos y resinas epoxi en los que se deducía una disminución de la resistencia de adherencia, quizás debido a que las barras ensayadas eran lisas y a que los sistemas epoxídicos y los tratamientos dados a las barras no eran tan perfectos.

Los resultados obtenidos confirman la propuesta de algunos investigadores [13] acerca de que un recubrimiento de 200 micras alcanza un óptimo entre durabilidad y exigencias mecánicas, en particular de adherencia acero-hormigón.

5. CONCLUSIONES

Los objetivos de este estudio eran comprobar la efectividad de la protección que ejerce el revestimiento de resina epoxi sobre las barras de acero de las armaduras y la conservación de las características resistentes del hormigón armado, contrastando ciertas opiniones que indican la disminución de la resistencia de adherencia del acero en dicho hormigón. Estos objetivos han sido cubiertos, efectiva y positivamente, validando los mismos la eficacia del empleo de las barras revestidas con resinas epoxi.

Tanto los recubrimientos con resinas epoxi, como sus posteriores reparaciones sobre daños localizados, han demostrado ser totalmente efectivas contra la corrosión, lo que hace que estas barras sean una opción válida para estructuras expuestas a ambientes altamente corrosivos como pueden ser los marinos, o con altas concentraciones de cloruros.

La buena de adherencia demostrada de las barras revestidas con resina epoxi al hormigón posibilita la utilización de las mismas en piezas sometidas a altas sollicitaciones y con responsabilidad estructural como pueden ser tableros y pilas de puentes. Los resultados obtenidos también señalan un incremento de la durabilidad de las estructuras construidas empleando barras con revestimiento epoxi, lo que permite eliminar algunas dudas existentes sobre este tipo de protección del acero.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a 3M España S.A. la financiación parcial de los trabajos realizados. Agradecen además al Instituto para la Promoción de Armaduras Certificadas (IPAC) las indicaciones recibidas durante el desarrollo del trabajo. También agradecen al Ministerio de Ciencia e Innovación la concesión del proyecto BIA2008-03523, y al Ministerio de Fomento el proyecto 01/07.

REFERENCIAS

- [1] MINISTERIO DE FOMENTO. *EHE-08. Instrucción de Hormigón Estructural*. Madrid: Ministerio de Fomento, 2008.
- [2] BROOMFIELD J.P. *Corrosion of Steel in Concrete*. 2nd ed. London: Taylor & Francis, 2007.
- [3] FIB. *Corrosion Protection of Reinforcing Steels*. FIB Bulletin 49. Lausanne, Switzerland: Federation Internationale du Beton, 2009. 122 p.
- [4] MANNING D.G. "Corrosion performance of epoxy-coated reinforcing steel: North American experience". *Construction and Building Materials*. 1996, vol. 10, n° 5, p. 349-365.
- [5] LAU K., SAGÜES A., POWERS R. "Corrosion of epoxy coated rebar in cracked submarine substructure concrete", *NACE Corrosion 2008*. 13 p.
- [6] PIANCA F., SCHELL H., CAUTILLO G. "The performance of epoxy coated reinforcement-Experience of the Ontario Ministry of Transportation". *ACI Special Publication*. 2006, n° 234-23, p. 373-398.
- [7] LEE S-K., KRAUSS P.D. *Long-Term Performance of Epoxy-coated Reinforcing Steel in Heavy Salt-Contaminated Concrete*. Pub. n° FHWA-HRT-04-090. McLean, VA (USA): Federal Highway Administration, 2004. 130 p.
- [8] ERDOGDU S., BREMNER T.W., KONDRATOVA I.L. "Accelerated testing of plain and epoxy-coated reinforcement in simulated seawater and chloride solutions". *Cement and Concrete Research*. 2001, vol. 31, n° 6, p. 861-867.
- [9] VENKATESAN P., PALANISWAMY N., RAJAGOPAL K. "Corrosion performance of coated reinforcing bars embedded in concrete and exposed to natural marine environment". *Progress in Organic Coatings*. 2006, vol. 56, n° 1, p. 8-12.
- [10] ACI Committee 318. *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318 and ACI 318R)*. American Concrete Institute, 2009.
- [11] ANDA L., COURTIER C., MOEHLE P. "Bond strength of prefabricated epoxy-coated reinforcement". *ACI Structural Journal*. 2006, vol. 103, n° 2, p. 226-234.

- [12] CAIRNS J. "Influence of fusion-bonded epoxy-coated reinforcement on beam deformation and rotation capacity". *ACI Structural Journal*. 2001, vol. 98, p. 69-75.
- [13] FIB. *Bond of Reinforced Concrete*. FIB Bulletin 10. Lausanne, Switzerland: Federation Internationale du Beton, 2000. 434 p.
- [14] ASTM. *Standard Specification for Epoxy-coated Prefabricated Steel Reinforcing Bars*. A934/ A934M-07, 2007.
- [15] ASTM. *Standard Specification for Epoxy-coated Steel Reinforcing Bars A775/ A775M-07b*, 2007.
- [16] CLEAR K.C., VIRMANI Y.P. "Corrosion of non-specification epoxy-coated rebars in salty concrete". *Public Roads*. 1983, vol. 47, p. 1-10.
- [17] SMITH J.L., VIRMANI Y.P. *Performance of epoxy coated rebars in bridge decks*. FHWA-RD-96-092. Washington, D. C.: Federal Highway Administration, 1996.