

ESTUDIO DE LA CORROSIÓN DE ARMADURAS EMBEBIDAS EN MORTEROS FABRICADOS CON SUSTITUCIÓN PARCIAL Y TOTAL DE ÁRIDOS POR ESCORIAS BLANCAS DE HORNO CUCHARA

María Isabel PRIETO BARRIO

Arquitecta, Arquitecto Técnico
Universidad Politécnica de Madrid
Profesora Titular de Escuela Universitaria
mariaisabel.prieto@upm.es

Ángel RODRÍGUEZ SÁIZ

Doctor Ingeniero en Organización Industrial
Universidad Politécnica de Burgos
Director del Departamento de Construcciones
Arquitectónicas e Ingenierías de la
Construcción y del Terreno
arsaizmc@ubu.es

Alfonso COBO ESCAMILLA

Doctor Ingeniero Industrial, Arquitecto
Universidad Politécnica de Madrid
Profesora Titular de Escuela Universitaria
alfonso.cobo@upm.es

Juan Manuel MANSO VILLALÁIN

Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos.
Universidad Politécnica de Burgos
Director del Departamento de
Ingeniería Civil
ingciv@ubu.es

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es estudiar el comportamiento frente a corrosión de barras de acero de armar embebidas en probetas de mortero en las que se ha sustituido total o parcialmente el árido por escorias de horno cuchara (LFS). Se han fabricado probetas prismáticas con y sin escorias (probetas patrón) y se han añadido cantidades variables de ión cloruro en el momento del amasado. Se han medido de forma periódica la velocidad de corrosión de las barras mediante la técnica de la curva de polarización y los resultados obtenidos, en términos de intensidad de corrosión (i_{corr}) y de potencial de corrosión (E_{corr}), se han comparado. Del análisis de los resultados obtenidos, se puede afirmar que el comportamiento frente a la corrosión inducida por iones cloruro es similar entre las barras de acero embebidas en probetas patrón y las barras incluidas en probetas fabricadas con sustitución parcial de árido por escorias blancas de horno cuchara (LFS).

PALABRAS CLAVE: Corrosión, armaduras, mortero, árido reciclado, escorias, LFS.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a la importancia que tiene el sector de la construcción en la economía mundial, ya que moviliza aproximadamente un 10% [1] y puesto que el hormigón en masa y armado es el material estructural más empleado, es muy importante estudiar la forma de emplearlo de manera que aumente su durabilidad.[2]. Uno de los principales factores que afecta a la durabilidad del hormigón armado es la corrosión de las armaduras. Se estima que los costes directos originados al año por la corrosión superan el 3,5% del PIB de una nación y que si se tomasen medidas se podría ahorrar entre el 20 y el 35% de dichos costes. [3]

Las armaduras embebidas en el hormigón se encuentran en estado pasivo debido al efecto protector de la alcalinidad que aporta el cemento al hidratarse. Esta protección se puede perder bien por efecto de la penetración del dióxido de carbono de la atmósfera a través de los poros del

hormigón (carbonatación) o bien por la acción de los iones cloruro, que pueden introducirse bien en los materiales que lo componen o penetrar desde el exterior. También se puede producir la corrosión de las armaduras por fenómenos de corrosión bajo tensión o fragilización por hidrógeno en el caso de hormigones pretensados, cuando confluyen un medio específico agresivo y un nivel tensional determinado.[4]

Para controlar el efecto de la corrosión en las estructuras de hormigón armado, la EHE además de limitar la cantidad de cloruros que pueden poseer cada uno de los materiales componentes, indica que el contenido total de cloruros en un hormigón que contenga armaduras no activas, debe ser inferior al 0,4% del peso de cemento en obras de hormigón armado u obras de hormigón en masa que contenga armaduras para reducir la fisuración.

Por otro lado, la creciente industria del acero, hace que las escorias generadas en el proceso siderúrgico de horno eléctrico, más de 2 millones de toneladas/año en España, necesiten su correcto tratamiento, ya que eso supondría beneficios en cuanto a la disminución de los costes de vertido, un ahorro de materias primas al integrarse en los procesos de fabricación de otros materiales y lo más importante la reducción del impacto medioambiental. Esta necesidad, hace que las empresas necesiten incorporar procedimientos tecnológicos que permitan recuperar los residuos generados en el proceso de producción del acero.[5].

Desde 1978, la Comunidad Europea del Carbón y del Acero (CECA), dispone de un comité de Estudio destinado a fomentar y gestionar proyectos que investiguen posibles soluciones al problema que generan las escorias siderúrgicas. En la actualidad existen numerosos estudios sobre posibles formas de reutilizar los residuos procedentes de la metalurgia, tanto de la escoria negra en cuanto a fabricación de morteros y de hormigones hidráulicos [6] como de la escoria blanca en morteros, firmes de pavimentación de caminos rurales, hormigones hidráulicos y morteros de albañilería. [7] [8] [9]

2. EXPERIMENTAL

2.1 Materiales

Para realizar el presente trabajo se han realizado probetas con cemento Pórtland CEM I/42,5 R, agua urbana potable, arena, escorias blancas de horno cuchara (LFS), plastificantes y retardadores de fraguado.

De los materiales que se han empleado en el presente trabajo de investigación, las escorias blancas de horno cuchara (LFS) es el menos frecuente, el que posee unas características más variables y una elemento fundamental en este trabajo de investigación.

La escoria blanca de horno cuchara es un subproducto que aparece en el proceso de afino y ajuste de la composición química del caldo de acero procedente del Horno Eléctrico de Arco (EAF) o del Convertidor de Oxígeno (BOF). Su posterior contacto con la temperatura del ambiente exterior produce su disgregación y desintegración, aclarándose paulatinamente su color y tomando cada vez un aspecto más pulverulento.

Para su posible uso en el ámbito de la construcción, es condición indispensable la estabilización de las mismas, lo que podría hacerse, del siguiente modo:

- a) Para conseguir un comportamiento uniforme de las escorias, es necesario removerlas para conseguir el contacto con el ambiente exterior de todos sus componentes.
- b) Regar las escorias en cantidades adecuadas para favorecer la formación de los hidróxidos de calcio y magnesio necesarios.
- c) Proteger el material de la acción del viento para evitar su dispersión.

En el presente trabajo se han utilizado escorias blancas procedentes de la factoría de la empresa Tubos Reunidos, con sede en Álava, España. Las escorias han llegado aún calientes al laboratorio de Grandes Estructuras de la Escuela Politécnica Superior de Burgos, donde se han tratado por un periodo de dos años hasta su correcta estabilización.

Una vez estabilizadas, se ha procedido a su caracterización, mediante el análisis de su composición química, análisis termogravimétricos y térmicos diferenciales, difracciones de rayos-X, microscopía electrónica de barrido y microanálisis por Energía dispersa de Rayos-X.

Las características más importantes de la escoria blanca de horno cuchara empleada son:

- Densidad de 2,65 g/cm³
- Superficie específica de 2064 cm²/g
- Ausencia prácticamente total de cloruros
- Cantidad total de azufre, expresada den ión sulfato <1%
- Ausencia de terrones de arcilla
- Ausencia de materia orgánica.

Las características químicas de las escorias blancas que se han empleado se pueden observar en la tabla 1.

Oxidos	Porcentaje (%)
CaO	56
SiO ₂	17
Al ₂ O ₃	11
MgO	10
Otros (Fe ₂ O ₃ +MnO+TiO ₂ +SO ₃ +Na ₂ O+K ₂ O)	6

Tabla 1. Composición y química de las escorias blancas de horno cuchara.

Para poder llevar a cabo la presente investigación, se han realizado dos series de cuatro morteros con diferentes dosificaciones de cemento, arena, agua empleadas como probetas patrón y otras a las que se les ha añadido escorias blancas de horno cuchara según se puede observar en las tablas 2 y 3.

MORTEROS									
REFERENCIA	RELACIÓN EN PESO			DOSIFICACIÓN EN PESO					
DESIGNACIÓN	CEMENTO	ARENA	AGUA	CEMENTO	ARENA	AGUA	PLAST. RETARD.	CANTIDAD	
MAC	1,00	6,00	1,02	99,8	598,7	101,5			800,0
MBC	1,00	6,00	0,75	103,2	619,4	77,4	1,548	0,516	800,0
MCC	1,00	6,00	1,03	99,6	597,5	102,9		0,498	800,0
MDC	1,00	6,00	0,83	102,1	612,7	85,2	1,532		800,0

Tabla 2. Dosificaciones de las probetas patrón.

MORTEROS CON ESCORIA											
DESIGNACIÓN	RELACION EN PESO				DOSIFICACIÓN EN PESO						
CEMENTO	ARENA	AGUA	ESCORIA	CEM.	ARENA	AGUA	ESC.	PLAST.	RET.	CANT.	
MAE	1,00	6,43	1,68	2,57	68,5	440,4	115,0	176,2			800
MBE	1,00	6,43	1,48	2,57	69,7	448,1	102,9	179,2	1,5	0,5	800
MCE	1,00	6,43	1,66	2,57	68,6	441,1	113,9	176,4		0,5	800
MDE	1,00	6,43	1,56	2,57	69,2	444,8	108,1	177,9	1,5		800

Tabla 3. Dosificaciones de las probetas con escorias blancas.

Además se han introducido en el momento del amasado distintos porcentajes de ión cloruro en función del peso de cemento, según se detalla en la tabla 4.

DESIGNACIÓN	0%	0,40%	0,80%	1,20%	2,00%
MAC	0	0,80	1,60	2,40	4,00
MBC	0	0,83	1,65	2,48	4,14
MCC	0	0,80	1,60	2,40	3,99
MDC	0	0,82	1,64	2,46	4,09
MAE	0	0,55	1,10	1,65	2,75
MBE	0	0,56	1,12	1,68	2,79
MCE	0	0,55	1,10	1,65	2,75
MDE	0	0,55	1,11	1,66	2,77

Tabla 4. Porcentajes de cloruros en función del peso de cemento.

De todas las dosificaciones con sus diferentes porcentajes de ión cloruro se han realizado dos probetas, obteniendo cuarenta familias diferentes de probetas, encontrándose todas ellas por duplicado.

2.2 Técnicas de medida

Que el fenómeno de la corrosión sea un proceso de movimiento de partículas con carga eléctrica, ha permitido su estudio mediante la medida de variables eléctricas. Ya en 1957 Stern y Geary[10] [11] [12] emplearon métodos electroquímicos para estudiar la corrosión, lo cual supuso un avance espectacular. Para determinar la velocidad de corrosión de las barras se ha empleado la técnica de la curva de polarización, en términos de intensidad de corrosión, la cual nos proporciona información cuantitativa del proceso de corrosión Según diversos autores, velocidades de corrosión mayores de $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$, que equivale a una penetración de corrosión de $11,6\mu\text{m}/\text{año}$ en el acero, reducen de manera importante la durabilidad de las estructuras de hormigón armado, si ésta se mantiene en el tiempo.[13] [14]. Del mismo modo se ha observado el potencial de corrosión (E_{corr}) o potencial en circuito abierto, ya que permite orientar sobre el estado pasivo o

activo de los aceros. La observación de la sintomatología también permite observar la evolución de la corrosión al aparecer manchas de óxido en las zonas donde está la armadura y evolucionar a lo largo del proceso. Para estudiar la evolución del corrosión, se han realizado probetas prismáticas de 6*8*2cm de mortero en las que se han embebido 3 barras de acero de armar de diámetro 6mm. La barra intermedia se ha empleado como electrodo de trabajo, la barra de la izquierda se ha utilizado como contraelectrodo y se ha empleado como electrodo de referencia el de plata-cloruro de plata (SSCE;+0,199V SHE). La superficie acero-hormigón-atmósfera se protegió con una cinta adhesiva para evitar un posible ataque localizado por aireación diferencial. Las probetas se han desecado de forma natural después de su curado. A continuación se han humedecido de forma gradual mediante su conservación en cámara húmeda y se ha medido la velocidad de corrosión y el potencial de corrosión tanto en las probetas patrón como en las que se ha sustituido parte del cemento y del árido por las escorias para su posterior comparación.

Para facilitar el contacto del contraelectrodo de referencia con la probeta de mortero, se colocó entre ambos una bayeta humedecida, según se puede observar en la figura 2. Además cada medida de velocidad de corrosión se encuentra asociada a la humedad de las probetas, medida en función del peso de las mismas.



Figura 1.- Montaje del experimento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 2 y 3 se puede observar el potencial de corrosión E_{corr} en función de la proporción de cloruros para las probetas patrón y probetas en las que se han empleado escorias.

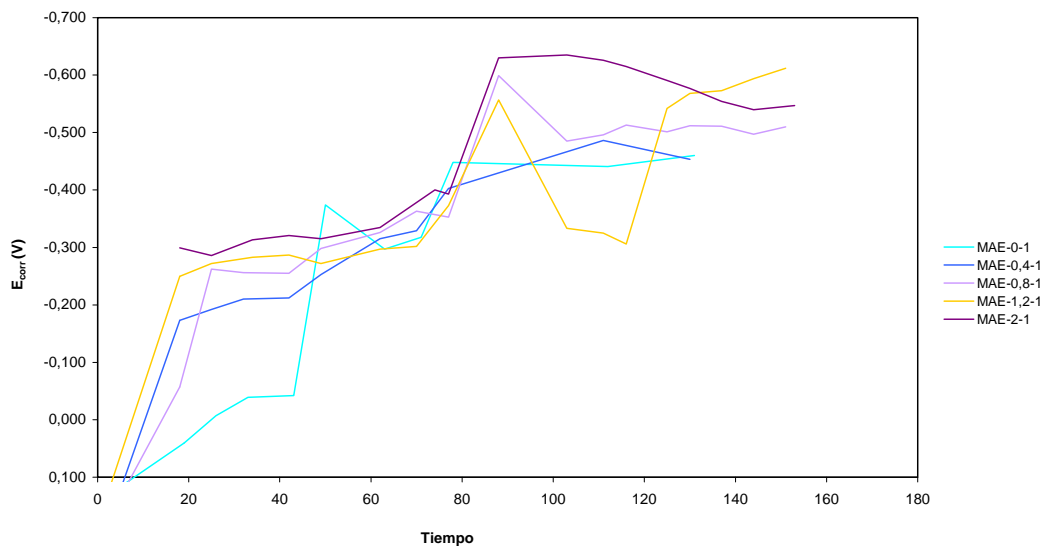


Figura 2.- Evolución del E_{corr} frente al tiempo, en probetas realizadas con escorias y con diferentes porcentajes de ión cloruro en peso de cemento.

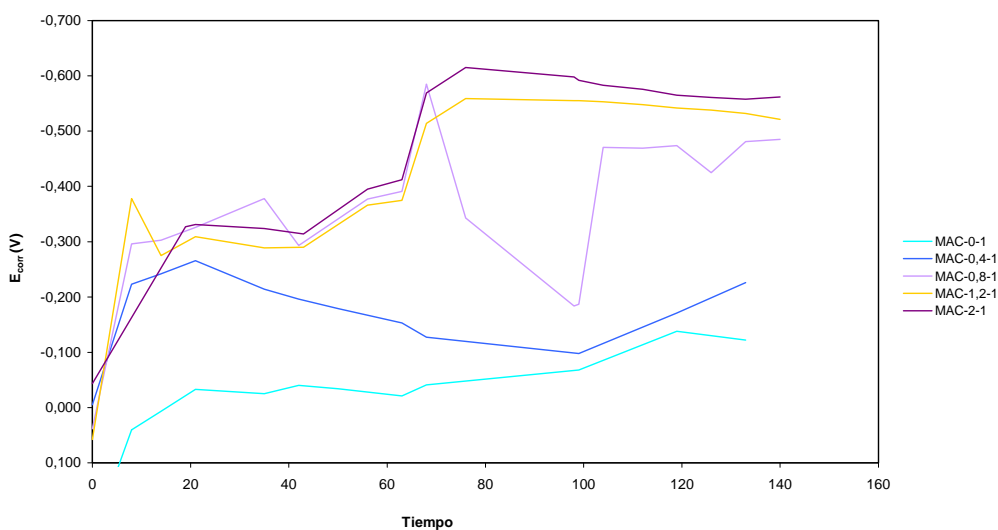


Figura 3.- Evolución del E_{corr} frente al tiempo, en probetas patrón con diferentes porcentajes de ión cloruro en peso de cemento.

En la figuras 4 y 5 se puede observar el comportamiento de la velocidad de corrosión en función de la humedad de la probeta tanto en probetas patrón como las que tienen escorias para un porcentaje del 0,4% de ión cloruro (límite de la norma EHE) y para un valor del 2%. Como se puede observar, las probetas aumentan paulatinamente su velocidad de corrosión al aumentar la humedad de la probeta, independientemente de la composición de la misma.

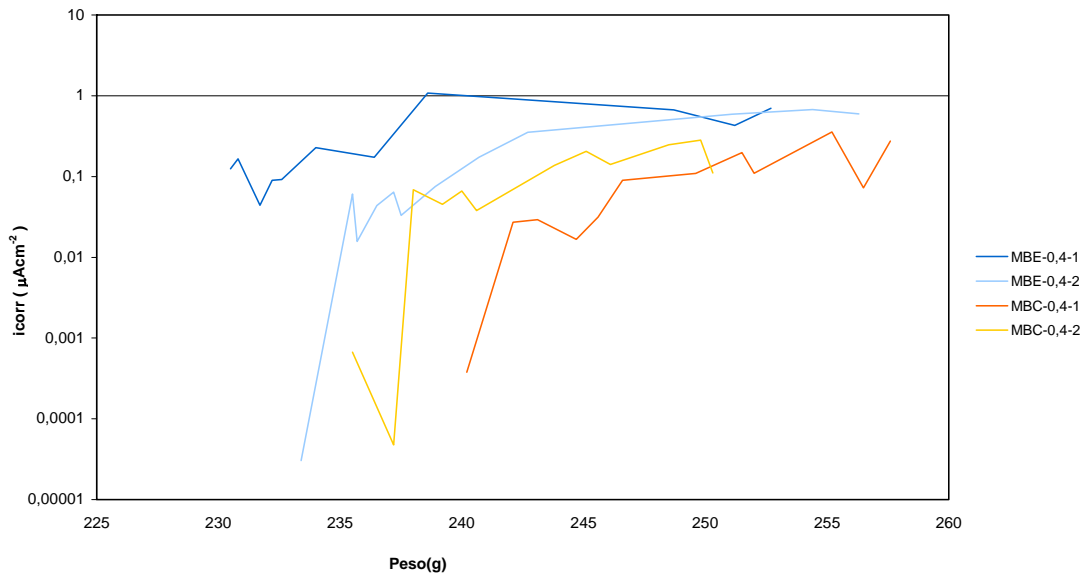


Figura 4.- Evolución de i_{corr} frente al peso, en probetas realizadas con y sin escorias con un 0,4% de ión cloruro en peso de cemento.



Figura 5 - Evolución del i_{corr} frente al peso, en probetas realizadas con y sin escorias con un 2% de ión cloruro en peso de cemento.

De la observación de las distintas figuras incluidas con anterioridad, se pueden observar los siguientes resultados:

El potencial de corrosión E_{corr} aumenta en función del tiempo y de la cantidad de cloruros que presentan las probetas, tanto en las probetas patrón como en las probetas con escorias. Los resultados han sido interpretados según la norma ASTM C 876-09 [15] y teniendo en cuenta el electrodo de referencia empleado (potenciales de corrosión inferiores, más negativos, que 151 mV indican una probabilidad superior al 90% de que exista corrosión en estado activo).

Como se puede observar, en las probetas patrón que poseen porcentajes de ión cloruro dentro de los límites de la EHE los potenciales de corrosión indican que se encuentran en estado pasivo. En las probetas patrón con porcentajes de ión cloruro superiores al 0,4%, los potenciales de corrosión indican que se encuentran en estado activo. En las probetas con escorias, independientemente del porcentaje de ión cloruro que posean, los potenciales de corrosión indican una corrosión activa. Tanto en probetas patrón como en probetas con escorias, los potenciales de corrosión se hacen más negativos, al aumentar la cantidad de cloruros que poseen las probetas. El empleo de esta técnica no sirve de orientación, pero sin perder de vista que el potencial de corrosión sufre variaciones muy importantes en función de la humedad.

La velocidad de corrosión aumenta de manera significativa en función de la humedad de la probeta tanto en probetas patrón como las que tienen escorias. Para valores dentro de los límites de la norma EHE, la velocidad de corrosión es inferior en las probetas patrón que en las probetas con escorias, pero teniendo en cuenta los niveles de corrosión sugeridos por Durar Network [16] según el cual $i_{corr} < 0,1 \mu A/cm^2$ pasivo, $0,1 \mu A/cm^2 < i_{corr} < 0,5 \mu A/cm^2$ corrosión baja, $0,5 \mu A/cm^2 < i_{corr} < 1 \mu A/cm^2$ corrosión alta y $i_{corr} > 1 \mu A/cm^2$ corrosión muy alta, podemos afirmar ambos grupos los valores de la velocidad de corrosión alcanzan valores correspondientes a una corrosión alta. La velocidad de corrosión en probetas patrón y en probetas con escorias para valores de un 2% de ión cloruro en peso de cemento son semejantes y corresponden a corrosiones muy altas.

4. CONCLUSIONES

El análisis de los resultados permite conocer, en función del tipo de mortero empleado, el umbral de cloruros con el que se produce la despasivación del acero y las velocidades de corrosión alcanzadas en aceros en estado activo en función de la humedad del mortero obtenida de forma cualitativa mediante el potencial de corrosión y técnicas gravimétricas.

Los resultados alcanzados hasta el momento son esperanzadores. Se puede afirmar que no existen diferencias significativas, en los comportamientos frente a una corrosión inducida por iones cloruro, entre las barras de acero embebidas en probetas patrón y las barras incluidas en probetas

fabricadas parcialmente con áridos procedentes de escorias. Tanto el umbral de cloruros que da lugar a la despasivación del acero, como la velocidad de corrosión alcanzada por las barras en estado activo son muy similares en ambos tipos de morteros.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] BOUZOUBAË, N., ZHANG, M. H , MALHOTRA, V. M., GOLDEN, D. M., “Blended fly ash cement- A review”, ACI Materials Journal, 96, 6, 1999, pp. 641-650.
- [2] EHE. “Instrucción de Hormigón Estructural” pp. 110-116.
- [3] OTERO, E. “Corrosión y degradación de materiales”. Editorial Síntesis, S.A. Madrid, 1997, cap I, pp.17-30
- [4] COBO, A., “ Corrosión de armaduras en estructuras de hormigón armado: Causas y procedimientos de rehabilitación”. Fundación Escuela de la Edificación. Madrid, 2001, pp. 23-27
- [5] MOTZ, M., GEISELER, J. “Products of steel slags an opportunity to save natural resources”. Waste Management (oxford, U.K.) 21(3). 2001.PP. 285-293
- [6] MANSO, J.M., “Fabricación de hormigón hidráulico con escoria negra de Horno Eléctrico de Arco”, Universidad de Burgos, España, 2001d
- [7] AMARAL, L., “Hormigones con escoria de Horno Eléctrico como áridos”. Propiedades, durabilidad y comportamiento ambiental”. Universidad Politécnica de Cataluña. España, 1999.
- [8] RODRÍGUEZ, A., “ Fabricación de morteros de albañilería con escoria blanca de horno cuchara y su utilización en construcción”, Universidad Politécnica de Burgos, España, 2008.
- [9] LOSÁÑEZ, M., “ Aprovechamiento integral de escorias blancas y negras de acería eléctrica en construcción y obra civil”; Universidad del País Vasco. España, 2005.ds.
- [10] STERN, M., GEARY, A.L., “Electrochemical polarization: I. A theoretical analysis of the shape of the polarization curves”, J. Electrochem. Soc., 104 (1) 1957, pp. 56-63
- [11] STERN, M., “ Surface area relationships in polarization and corrosion”, Corrosion, 14, 1958, pp.329-332
- [12] STERN, M., WEISERT, E.D., “Experimental observations on the relation between polarization resistance and corrosion rate”. Proc. Am. Soc. Test. Mater., 59, 1959, 1280.
- [13] CLEAR, K.C., Test Procedures. Data Analysis and General Information. July 1990. Appendix, pp.9.
- [14] GONZÁLEZ, J.A., BENITO, M., BAUTISTA, A., RAMÍREZ, E. Rev. Metal. Madrid, 30, 1994, pp.271.
- [15] ASTM C876-09 “Standard Test Method for Half-cell Potentials of uncoated reinforcing steel in concrete”.
- [16] NETWORK, D., “Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado”, CYTED programe, Rio de Janeiro, 1997.

