

CORROSIÓN DE HORMIGÓN RECICLADO ARMADO EN AMBIENTE MARINO

Villagrán¹, Y.A., Zega, C. J.², Zicarelli, S. S.³ y Di Maio, A. A.⁴

RESUMEN

El hormigón reciclado es una excelente opción en cuanto a la sostenibilidad en la industria de la construcción. Sin embargo, los agregados constituidos por hormigón triturado usualmente poseen una alta porosidad y puede resultar en detrimento de la durabilidad de las armaduras. En este trabajo se expone un estudio sobre hormigones reciclados armados, de relaciones agua/cemento 0,40, 0,50 y 0,60, adoptando dos espesores de recubrimiento. Se analizaron los comportamientos frente a parámetros relacionados con la corrosión de armaduras como son el potencial de corrosión, la corriente de corrosión y el contenido de cloruro. Las mediciones fueron realizadas en muestras expuestas en ambiente marino durante un período de 50 meses. Finalizada la exposición, se corroboró visualmente el estado de las armaduras. Los resultados muestran, como era de esperar, una clara influencia de la relación a/c en el ingreso de cloruros, pero además indican la influencia sobre la velocidad de deterioro de la relación a/c una vez despasivadas las armaduras, así como contenidos umbrales de cloruros para estos hormigón reciclados. Finalmente se valora la corrosividad de las armaduras en hormigón reciclado en función del espesor de recubrimiento y la relación agua/cemento.

INTRODUCCION

La ubicación definitiva del material de demolición resulta una problemática ambiental en grandes zonas urbanas. El hormigón de desecho triturado usado como agregado grueso para elaborar nuevos hormigones permite solucionar parcialmente esta situación. También pueden surgir motivos económicos para su aplicación gracias a la reducción de las distancias de transporte de los agregados, conduciendo también a una menor explotación de recursos naturales no renovables. Aunque el hormigón triturado presenta mayor absorción y porosidad comparado con los agregados de origen natural utilizados habitualmente (1), su uso no implica necesariamente el menoscabo de las propiedades durables del hormigón armado reciclado (2-4).

La absorción y otras propiedades de los agregados, al influir en las propiedades de transporte del hormigón, pueden afectar la durabilidad de las estructuras, particularmente la protección que el recubrimiento brinda a las armaduras. En ambientes marinos, el ingreso de cloruros en el hormigón armado está directamente relacionado con la durabilidad de las armaduras, debido a que define el tiempo requerido para que se inicie la corrosión de las mismas. Las armaduras empotradas se despasivan en forma localizada cuando un

¹ Becario CONICET, LEMIT. Docente Fac. Ing., UTN Reg LP

² Becario CONICET, LEMIT. Docente Fac. Ing., UNLP

³ Personal de apoyo CIC, LEMIT.

⁴ Investigador CONICET, LEMIT. Sub-director LEMIT.

contenido de cloruros superior a un umbral mínimo se dispone en su superficie. Asimismo, para que se produzca la corrosión localizada a una velocidad considerable es necesaria la presencia simultánea de una alta humedad relativa y oxígeno en el hormigón.

Si el hormigón tiene un contenido de cloruros menor al necesario para despasivar a las armaduras, el tiempo requerido para este proceso está dado por la velocidad de ingreso de cloruros desde el medio externo. El factor que determina la velocidad de ingreso de cloruros en el hormigón es su estructura porosa (5-8), definida principalmente por el volumen total de vacíos, la distribución de tamaños y la conectividad de los poros. De esta forma, parámetros como la relación agua/cemento (a/c) adquieren importancia al momento de lograr un hormigón resistente al ingreso de cloruros (6, 9).

La probabilidad y velocidad de corrosión de armaduras en hormigón pueden ser evaluadas mediante técnicas electroquímicas, y su evolución en el tiempo refleja la pasividad de las armaduras durante el período de iniciación. De esta forma, se obtiene información del estado actual de la estructura y herramientas de predicción de su comportamiento futuro.

En el presente trabajo se estudia la evolución en el tiempo de los parámetros electroquímicos de corrosión y del contenido de cloruros a nivel de las barras de armadura. Se analiza la interrelación entre los parámetros de corrosión mencionados en probetas de hormigón reciclado armado de relación a/c 0,40, 0,50 y 0,60 expuestas en atmósfera natural marina.

Potencial de corrosión (E_{corr})

El potencial de corrosión es el estado estacionario en el cual se igualan las velocidades de reacciones de oxidación y de reducción. Las diferencias de potencial electroquímico originan regiones que actúan anódicamente (oxidación) frente a otras que lo hacen catódicamente (reducción). Cuando un metal se sitúa en contacto con una solución que contiene sus iones, en condiciones estacionarias el sistema metal-electrolito se sitúa en un potencial de equilibrio. Este potencial raramente concuerda con el potencial de un metal en medios habituales, ya que no son los iones metálicos los que captan a los electrones, sino los iones H^+ o el O_2 al reducirse. En estas condiciones, el potencial medido sobre el metal suele corresponder a un potencial mixto (potencial de corrosión) resultante de la verificación simultánea de dos o más procesos en condiciones de no-equilibrio.

La medición del potencial de corrosión es siempre relativa a un electrodo de referencia. El acero de la armadura en contacto con la solución de poros constituye una hemicelda, que se completa con la del electrodo de referencia para cerrar el circuito de medición. La determinación del potencial de corrosión de la armadura permite identificar en cierto modo si la barra se encuentra en estado pasivo o activo. Su valor depende de muchos factores, y en la práctica resulta indicativo pero no siempre concluyente. En estructuras de hormigón armado, el estado de humedad es el parámetro que genera mayor variabilidad en las lecturas (10). Se define, entonces, una probabilidad de corrosión de acuerdo al valor del potencial medido (Tabla 1), aludido siempre a un electrodo de referencia (por ejemplo, versus electrodo de calomel saturado, ECS). El esquema para medir el potencial de corrosión puede verse en la Fig. 1.

Tabla 1. Probabilidad de corrosión de acuerdo al potencial de corrosión.

vs. ECS E_{corr} (mV)	Probabilidad de corrosión	
	Stratful (en puentes) (10)	ASTM C 876 (11)
-120	0 %	10 %
-160		
-200		
-270	50 %	90 %
-370	95 %	
-420	100 %	

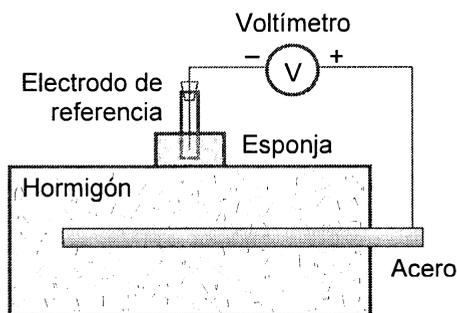


Figura 1. Esquema de medición de potencial de corrosión.

Velocidad de corrosión (i_{corr})

La condición de pasividad de las armaduras también puede ser estudiada por la medición de la velocidad de corrosión. Consiste en la comprobación de la densidad de corriente originada en la pila electroquímica de corrosión. Esta corriente resulta proporcional a la velocidad a la cual disminuye el espesor de la armadura cuando la corrosión se desarrolla uniformemente en la superficie.

Mientras que E_{corr} es un parámetro termodinámico que determina la estabilidad de las especies (probabilidad de corrosión), i_{corr} es un parámetro que determina la cinética del proceso (velocidad de corrosión).

La velocidad de corrosión puede determinarse experimentalmente mediante la técnica de la resistencia a la polarización. Se parte del potencial E_{corr} y se polariza $\pm 10/30$ mV, dependiendo del potencial de equilibrio. Se miden entonces las corrientes respectivas y se calcula la resistencia de polarización R_p como la pendiente de la curva corriente-potencial registrada. Esta resistencia es la que ofrece la interfase metal-solución al paso de corriente y es inversamente proporcional a la velocidad de corrosión (12). La constante de

proporcionalidad es la relación de pendientes de Tafel, adoptada igual a 0,026 V en estado pasivo y a 0,052 V en estado activo.

La velocidad de corrosión es también indicativa en el período de propagación, ya que marca la velocidad de crecimiento del volumen de los productos de corrosión. Así, las mediciones resultan estimativas del período a partir del cual pueden esperarse daños en la estructura (Tabla 2). En el caso particular de la corrosión por picado, cuando se toman lecturas experimentales, la corriente de corrosión en la zona activa se diluye debido a su relación de áreas con la zona catódica. En corrosión localizada, la profundidad máxima de penetración del picado puede ser entre 4 y 8 veces el valor de la profundidad media de ataque (13).

Tabla 2. Período esperable de deterioro.

Referencia	DURAR (12)	AASHTO (14)
i_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	Velocidad	Interpretación en estructuras
0,1	Despreciable	Sin daño esperable
0,2	Bajo	
0,5	Moderado	Daño esperable en 10-15 años
1,0	Alto	Daño esperable en 2-10 años
10,0		Daño esperable en menos de 2 años

Contenido umbral de cloruros

Se asume que existe un contenido umbral de cloruros por debajo del cual es muy baja la probabilidad de que se produzcan picaduras, debido a que la capa pasiva es capaz de regenerarse rápidamente. Las condiciones específicas que conducen al inicio de la corrosión por picado con un contenido umbral de cloruros no están completamente establecidas. No se cuenta con valores representativos del contenido umbral de cloruros, que son requisito para el cálculo de la vida útil de las estructuras, específicamente la duración del período de iniciación. Existen numerosas variables que influyen y que ocasionan que el contenido umbral de cloruros no sea un valor único. Entre los factores se encuentran la rugosidad superficial del acero, las propiedades del hormigón, la agresividad del ambiente y la relación entre estos mismos factores (15). Estos parámetros son los mismos que determinan la naturaleza de la capa pasiva, y por lo tanto resulta lógico intuir una relación directa entre el potencial de corrosión y el contenido umbral de cloruros. Valores hallados del contenido umbral de cloruros totales, van desde 0,2 a 2,5 % en peso del cemento (15-17).

DESARROLLO EXPERIMENTAL

Materiales y mezclas

Para la elaboración de los hormigones se utilizó CPC40 de tipo comercial, con adiciones de escoria de alto horno y filler calcáreo. Como agregado fino se empleó arena silícea de río con módulo de finura de 2,5. Se utilizaron dos tipos de agregado grueso, piedra partida granítica natural y hormigón triturado, ambos con tamaño máximo de 19 mm. El último agregado, denominado agregado reciclado, fue obtenido de la trituración de distintos hormigones con niveles de resistencia variables y preparados con agregados gruesos graníticos. En la Tabla 3 se informan algunas propiedades de los agregados gruesos utilizados.

Tabla 3. Propiedades de los agregados gruesos utilizados.

Agregados	Densidad (D_{SSS})	Absorción (%)
Piedra Partida Granítica	2,69	0,3
Hormigón Triturado	2,46	4,6

Se realizaron tres hormigones reciclados en los cuales el 75 % en volumen del agregado grueso estuvo constituido por el agregado reciclado y el 25 % restante por el agregado granítico. El hormigón triturado fue saturado en agua durante 24 horas previamente a la elaboración de los hormigones, a fin de evitar una pérdida de asentamiento debida a la significativa absorción que el mismo posee. Se adoptaron relaciones a/c 0,40, 0,50 y 0,60, denominándose a los hormigones respectivos R40, R50 y R60. Las proporciones de los materiales utilizados y algunas propiedades de los hormigones en estado fresco y endurecido se indican en las Tablas 4 y 5, respectivamente.

Se moldearon probetas prismáticas de 70x100x250 mm para medir la velocidad de ingreso de cloruros y probetas cilíndricas de hormigón armado de 100 mm diámetro para evaluar los parámetros electroquímicos. En estas últimas, se dispusieron dos barras de acero conformado de 12 mm de diámetro, con 20 y 40 mm de recubrimiento (Fig. 2). La cara circular a través de la cual emergían las barras fue pintada con el fin de proteger a las armaduras en la zona de ingreso al hormigón.

Tabla 4. Proporciones de los materiales (kg/m^3).

Materiales	Hormigones		
	R40	R50	R60
Agua	155	155	155
CPC40	388	309	258
Arena silícea	831	897	939
Piedra partida granítica	258	258	258
Hormigón Triturado	716	716	705

Tabla 5. Propiedades de los hormigones en estados fresco y endurecido.

Propiedades	Hormigones		
	R40	R50	R60
Asentamiento (mm)	60	70	50
Peso unitario (kg/m ³)	2350	2340	2310
Aire (%)	2,6	2,7	3,6
Absorción (%)	7,1	7,5	7,7
Porosidad total (%)	15,3	16,1	16,5
Penetración media de agua a presión (mm)	11	26	n/d
Resistencia a compresión 28 días (MPa)	31,6	23,6	16,1

Durante el primer día de curado los moldes fueron mantenidos cubiertos y en ambiente de laboratorio (20 ± 5 °C). Luego las probetas fueron desmoldadas y colocadas en cámara húmeda (HR: 95 %, T: 23 ± 2 °C) hasta los 28 días de edad.

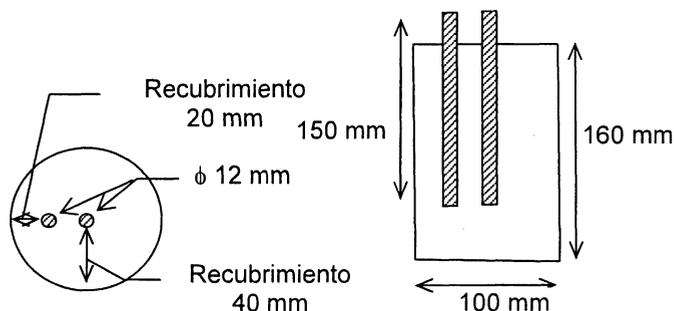


Figura 2. Probetas para medición de parámetros electroquímicos.

Exposición atmosférica y propiedades medidas

Una vez finalizado el período de curado, las probetas fueron situadas a la intemperie (T_{media} : 20 °C, HR_{media} : 85 %) entre 30 y 45 días previamente a su exposición en atmósfera marina.

La estación de exposición está ubicada en la ciudad de Mar del Plata, Argentina. La zona presenta una temperatura media anual de 15 °C, con un rango de temperaturas medias entre 3 y 27 °C, la humedad relativa ambiente media es del 80 % y las precipitaciones anuales promedio son de 900 mm.

Las probetas se colocaron a 15 m de la línea media de costa marina y 5 m de altura. La ubicación resultó tal que no se produjo en ningún momento el contacto directo entre las probetas y el agua de mar, quedando expuestas al aerosol marino y la lluvia. La cara de ingreso se dispuso en posición vertical orientada al mar (Fig. 3).



Figura 3. Estación de exposición en ambiente marino.

Se determinó el contenido de cloruros solubles en agua sobre muestras de las probetas según IRAM 1857, para profundidades correspondientes con el espesor de recubrimiento de las probetas armadas en períodos de exposición de 6, 12 y 18 meses. Una vez finalizado el período de exposición (50 meses), las probetas de hormigón armado fueron fracturadas por compresión diametral para evaluar la superficie de las armaduras. Se determinó el área relativa con signos de corrosión activa, y se analizó el contenido de cloruros solubles en agua del hormigón en contacto con las armaduras. Durante la exposición se determinaron los potenciales y corrientes de corrosión en tres probetas por cada tipo de hormigón estudiado cada 3 a 6 meses.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la Fig. 4 se muestra la evolución de la concentración de cloruros a nivel de las armaduras, en profundidades de 20 y 40 mm. Se observa una clara diferenciación entre las relaciones a/c, como así también entre los dos recubrimientos adoptados para cada una de ellas.

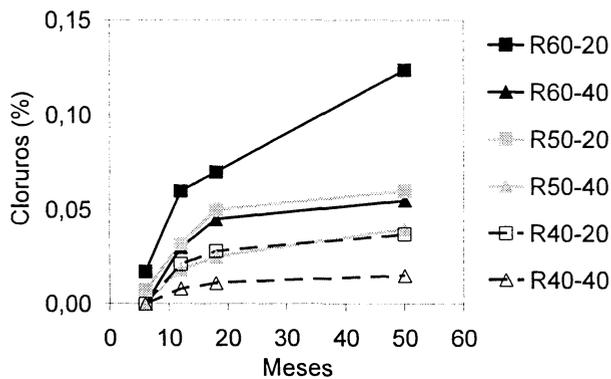


Figura 4. Evolución en el tiempo del contenido de cloruros a nivel de las barras.

También se nota, como era de esperar (18), un aumento del contenido de cloruros con la relación a/c. Un aspecto a resaltar es el hecho que el recubrimiento de 40 mm para la relación a/c 0,60 (R60-40) implica una protección frente a la corrosión localizada similar a la del recubrimiento de 20 mm para la relación a/c 0,50 (R50-20), análogamente a lo que sucede entre a/c 0,50 con recubrimiento de 40 mm y a/c 0,40 con recubrimiento de 20 mm (R50-40 y R40-20).

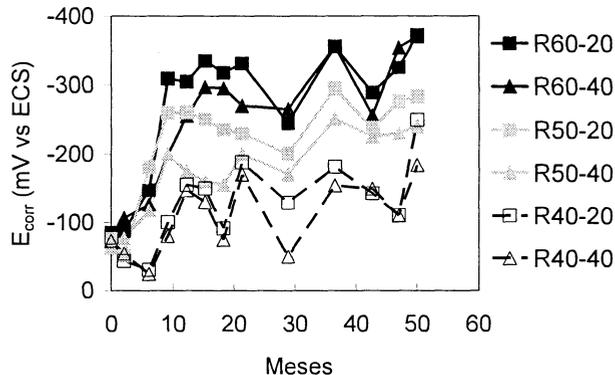


Figura 5. Evolución en el tiempo de los potenciales de corrosión.

En la Fig. 5 se muestra la evolución en el tiempo del potencial de corrosión. La distinción principal entre las diferentes armaduras se produce debido a la relación a/c y en segundo término por el espesor de recubrimiento. Es notorio el hecho de que con 50 meses de exposición sólo las armaduras en hormigones con a/c 0,40 mantienen potenciales más positivos que -200 mV vs. ECS. De manera que aún para recubrimientos de 40 mm de espesor, hormigones con relaciones a/c 0,50 o superiores y 75 % de agregado grueso reciclado permiten la despasivación de armaduras antes de los 5 años de exposición en el ambiente seleccionado.

El potencial de corrosión se relaciona en gran medida con el contenido de humedad del recubrimiento, y por lo tanto es esperable que cuanto más poroso sea éste, más negativo sea el potencial de corrosión. En el período inicial de exposición, a pesar de que en ninguno de los hormigones estudiados puede considerarse que las armaduras se encuentran activas, a mayor relación a/c, más electronegativo resulta el potencial de corrosión. La influencia de la porosidad del recubrimiento sobre el potencial de corrosión se ve resaltada por el menor espesor del recubrimiento. Relacionado con lo anterior se encuentran las notables variaciones entre algunas mediciones consecutivas. Las mismas son consecuencia del contenido de humedad del hormigón de recubrimiento ya sea por precipitaciones recientes o por condiciones de humedad relativa estacionales.

En la Fig. 6 se muestra la evolución de las corrientes de corrosión. La despasivación de armaduras no puede ser verificada mediante las mediciones de corrientes de corrosión. Aunque los valores de densidad de corriente no han sido afectados por coeficientes de mayoración por picadura, tampoco es posible determinar a partir de su evolución el inicio de la corrosión y por lo tanto el momento a partir del cual estos factores deben ser aplicados.

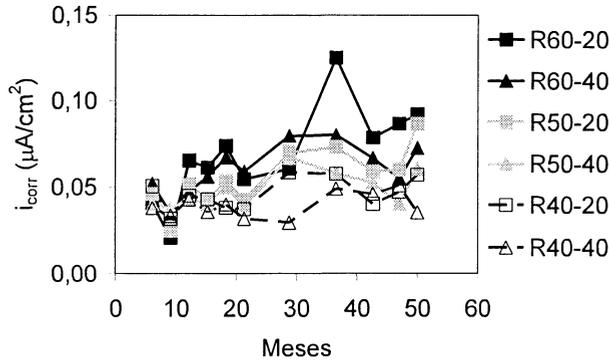


Figura 6. Evolución en el tiempo de las corrientes de corrosión.

Considerando solamente los parámetros electroquímicos (corriente y/o potencial de corrosión) no resulta posible identificar un período de exposición específico a partir del cual se despasivaron las armaduras, por lo que resultó muy útil la complementación de estas técnicas no destructivas con la inspección visual de las armaduras empotradas. Tanto el potencial de corrosión como la corriente de corrosión muestran una evolución permanente de sus valores.

La sensibilidad de la técnica de la resistencia de polarización respecto a la corrosión localizada por cloruros es pequeña y puede ser debida al diámetro de las barras. A mayor diámetro, mayor dilución de la corriente activa de picado respecto al área total. De esta forma es necesario que una porción importante de la superficie de la barra que se está midiendo se encuentre activa para que pueda registrarse una corriente de corrosión indicativa de las picaduras. La sensibilidad del método aumentaría si se utilizaran armaduras de menor diámetro. En todo caso, lo mencionado debería tenerse en cuenta al momento de la evaluación de una estructura, donde el diámetro de las armaduras es un parámetro dado y, por lo tanto, el método de medición de la corriente de corrosión debe adecuarse a las características de las armaduras y no al revés.

En la Fig. 7 se muestran las superficies relativas de armadura que presentaron signos de corrosión activa cuando fueron extraídas de las probetas de hormigón, en función de la relación a/c y el espesor de recubrimiento. La relación entre el porcentaje de área activa y la relación a/c presenta una tendencia exponencial. Esto puede ser resultado tanto del contenido de cloruros correspondiente al hormigón en contacto con cada armadura, como de la protección física del hormigón de recubrimiento sobre las armaduras activas. Este hecho se verifica en una mayor diferencia de área corroída entre los recubrimientos de 20 y 40 mm al incrementarse la relación a/c. Por lo tanto, la mayor protección limitaría la disponibilidad de oxígeno necesario para la reacción catódica y a medida que la porosidad del hormigón disminuye es menor la cantidad de productos de corrosión.

El contenido umbral de cloruros puede ser identificado dentro de cierto rango cuando se tienen en cuenta las áreas corroídas de las armaduras y se verifican los potenciales y corrientes de corrosión. En la Fig. 8 se muestran las relaciones entre las áreas corroídas y el contenido de cloruros solubles en agua del hormigón inmediato, determinado

analíticamente sobre el hormigón luego de fracturar las probetas para extraer las barras. Existe una tendencia indica un contenido cercano a 0,05 % en peso del hormigón (entre 0,045 y 0,06 %, equivalente a 0,34 y 0,54 % en peso del cemento) de cloruros solubles en agua como contenido umbral de cloruros para las relaciones a/c 0,50 y 0,60, mientras que no puede asumirse un valor para R40. Estos rangos se enmarcan en los citados en la bibliografía (15-17), entre los valores más bajos del rango de datos considerado.

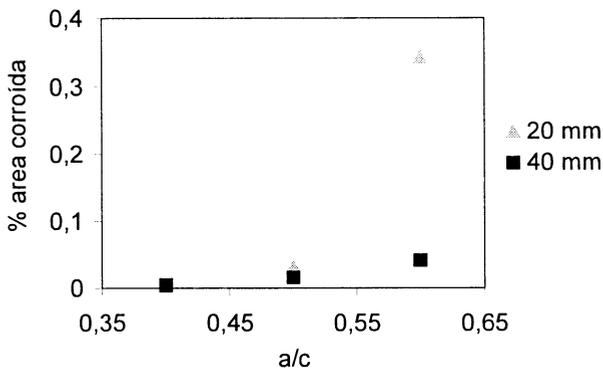


Figura 7. Relación entre las áreas superficiales activas de las armaduras y la relación a/c.

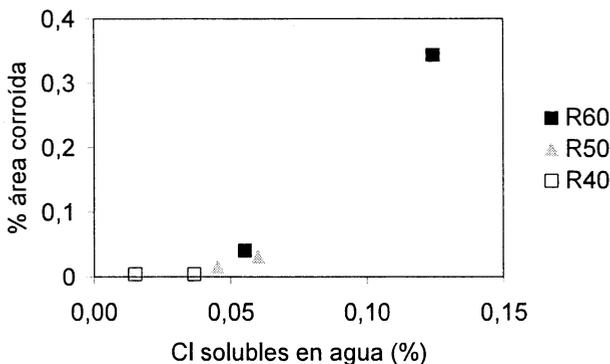


Figura 8. Relación entre las áreas superficiales activas de las armaduras y el contenido de cloruros solubles en agua.

Los rangos de corrosión encontrados no resultan en un grado de deterioro avanzado de las armaduras, sino que son aún síntomas de la proximidad del fin del periodo de iniciación, particularmente en el caso del hormigón con a/c 0,50. Estructuralmente esto no compromete al material en su capacidad resistente, ya que las disminuciones de sección de las armaduras son mínimas. Pero, al verse la velocidad de degradación notablemente incrementada, significa un quiebre en cuanto al comportamiento durable del material. Esto se ve reflejado cuando se comparan los porcentajes de área corroída de las armaduras con los contenidos de cloruros. Aunque debe tenerse en cuenta la diferente barrera física que suponen distintos espesores de recubrimiento, es notable observar el caso de las barras en el hormigón con a/c 0,60. En este caso un contenido de cloruros de 0,055 % significa para

las barras con 40 mm de recubrimiento un área activa del 4 %, mientras que un contenido de cloruro de 0,124 % para 20 mm de recubrimiento significa un área activa de la barra del 34 %. Esto implica un incremento relativo de 125 % en el contenido de cloruros a nivel de las barras, mientras que el incremento relativo de las áreas activas es del 750 %.

La velocidad de propagación de los efectos de la corrosión activa se manifiesta con valores muy superiores a la velocidad de deterioro en el período de iniciación.

CONCLUSIONES

Se evaluó el comportamiento de armaduras en hormigones elaborados con 75 % de agregado grueso reciclado, que fueron expuestos en un ambiente marino natural. Se midieron contenidos de cloruros y parámetros de corrosión (E_{corr} e i_{corr}) por 50 meses de exposición. De los resultados obtenidos surgen las siguientes conclusiones:

- Se confirma para este caso particular la gran influencia de la relación a/c sobre la durabilidad de las armaduras frente a cloruros. Esto resulta altamente importante tanto respecto al período de iniciación (velocidad de ingreso de cloruros), como respecto al período de propagación (velocidad de corrosión activa). Una vez despasivadas las armaduras, la relación a/c del hormigón de recubrimiento (no fisurado) continúa influyendo en la velocidad de deterioro debido a la diferente protección física surgida de la porosidad de cada hormigón.
- Los hormigones con relaciones a/c 0,50 o mayores no aseguraron un período de iniciación mayor a 50 meses, aún para espesores de recubrimiento de 40 mm. Solamente en el hormigón con relación a/c 0,40 las armaduras mostraron parámetros de corrosión indicando pasividad, lo que fue corroborado con la inspección visual de las mismas.
- Los resultados obtenidos indican contenidos umbrales de cloruros solubles en agua (según IRAM 1857) que se ubican en el entorno 0,045 y 0,06 % en peso del hormigón para los hormigones R50 y R60, equivalente a 0,34 y 0,54 % en peso del cemento.

REFERENCIAS

- (1) Zega, C. J. y Di Maio, A. A. "Efecto del agregado grueso reciclado sobre las propiedades del hormigón", Boletín Técnico del Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, IMME, Venezuela, Vol. 45, N 2, 2007, pp. 1-11
- (2) Tanaka, K., Yada, K., Maruyama, I., Sato, R. and Kawai, K. "Study on corrosion of reinforcing bar in recycled concrete", Proc. International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures, Barcelona, España, Vol. 2, 2004, pp. 643-650.
- (3) Villagrán Z., Y. A., Taus, V. L., Zega, C. J., Di Maio, A. A. y Traversa L. P. "Propiedades de transporte en hormigones convencionales y reciclados y su influencia en la corrosión de armaduras", Proceedings fib Symposium "El Hormigón Estructural y el Transcurso del Tiempo", La Plata, Argentina, Vol.1, 2005, pp. 91-98.

- (4) Villagrán Zaccardi, Y. A., Zega, C. J. and Di Maio, A. A. "Chloride penetration and binding in recycled concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 20, N 6, 2008, pp. 449-455.
- (5) Saetta A. V., Scotta R. V. and Vitaliani R. V. "Analysis of chloride diffusion into partially saturated concrete", *ACI Materials Journal*, Vol. 90, N 5, 1993, pp. 441-451.
- (6) Collepardi, L., Marcialis, A. and Turriziani, R. "Penetration of chloride ions in cement pastes and in concrete", *Journal of American Ceramic Society*, Vol. 55, 1972, pp. 534-535.
- (7) Jensen, O. M., Coats, A. M. and Glasser F. P. "Chloride ingress profiles measured by electron probe micro analysis", *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, 1996, pp. 1695-1705.
- (8) Chatterji, S. "Transportation of ions through cement based materials. Part 1. Fundamental equations and basic measurement techniques", *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, 1994, pp. 907-912.
- (9) Monosi, S., Moriconi, G., Alverà, I. and Collepardi, M. "Effect of water/cement ratio and curing time on chloride penetration into concrete", *Materials Engineering*, Vol. 1, 1989, pp. 483-489.
- (10) Stratfull, R. F. "Corrosion autopsy of a structurally unsound bridge deck", *American Highway Research*, Record N 433, 1973, 12 p.
- (11) ASTM C876, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, ASTM, Filadelfia, 1991.
- (12) DURAR Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, CYTED, Maracaibo, Venezuela, 1998, 208 p.
- (13) González, J. A., Andrade, C., Alonso, C. and Feliú S. "Comparison of rates of general corrosion and maximum pitting penetration on concrete embedded steel reinforcement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, N 2, 1995, pp. 257-264.
- (14) Clear, K. C. "Measuring rate of corrosion of steel in field concrete structures", *Transportation Research Record* N 1211, 1989, pp. 28-37.
- (15) Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M. and Castro, P. "Chloride threshold values to depassivate reinforcing bars embedded in a standardized OPC mortar", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, 2000, pp. 1047-1055.
- (16) Fluge, F. "Marine chlorides. A probabilistic approach to derive provisions for EN 206-1", *Third Workshop on Service Life Design of Concrete Structures – From Theory to Standardization*, 2001, Tromsø, Noruega, 23 p.
- (17) Vassie, P. and TRRL. "Reinforcement corrosion and the durability of concrete bridges", *ICE Proceedings*, Vol. 76, N 3, Part 1, 1984, pp. 713-723.
- (18) Frederiksen, J. M., Sørensen, H. E., Andersen, A. and Klinghoffer, O. "HETEK. The effect of w/c ratio on chloride transport into concrete – Immersion, migration and resistivity tests", Report N 54, The Road Directorate, Denmark Ministry of Transport, 1997, 35 p.