



TÓPICO 1 – (Patologías de las construcciones)

Patologías desarrolladas en una estructura de hormigón en zona marítima

Señas L.^{1,a}, Maiza P.^{2,b}, Priano C.^{1,c} y Marfil S.^{3,d}

¹Dpto. de Ingeniería - UNS. Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina

² Dpto. de Geología – UNS. CONICET–INGEOSUR. San Juan 670. B. Bca. Argentina

³ Dpto. de Geología – UNS. CIC de la Prov. de Bs. As. – INGEOSUR. San Juan 670. Bahía Blanca, Argentina

^alsenas@uns.edu.ar, ^bpmaiza@uns.edu.ar, ^ccpriano@uns.edu.ar, ^dsmarfil@uns.edu.ar

Palabras-clave: patologías, hormigón, RAS

Resumen

Se inspeccionó una obra de hormigón armado ubicada en la zona costera al mar, perteneciente al puerto de Bahía Blanca (Argentina). Ésta presentaba un importante cuadro de fisuración en el hormigón y evidencias de un proceso corrosivo en las armaduras, con exudación de compuestos de hierro hacia la superficie. Se realizaron ensayos físico-mecánicos y estudios petrográficos, sobre testigos calados en la estructura. Los resultados de los ensayos físico-mecánicos indican: valores menores de resistencia a compresión respecto a los que deberían tener este tipo de estructuras, una profundidad de carbonatación que en algunos casos supera el espesor del recubrimiento, y valores de absorción y porosidad elevados. Con estereomicroscopio y microscopía de polarización sobre secciones delgadas se encontraron claras coronas de reacción hacia el interior de las partículas, y se observaron cavidades de aire y fisuras rellenas parcialmente por carbonato de calcio, ettringita y alúminosilicatos. Por difracción de rayos X se identificaron alúminosilicatos de estructuras ceolíticas y material amorfo adjudicado al desarrollo de la RAS. En la parte interna de las barras de acero se vieron óxidos de hierro casi negros (magnetita (Fe_3O_4)), circundados por hematita (Fe_2O_3) la cual desarrolla mayor dispersión, y da una pátina rojiza en la zona externa más alejada. El mayor volumen de los productos de corrosión generó el descascaramiento superficial del hormigón, dejando las armaduras expuestas al ambiente marino.

Introducción

El agua de mar presenta valores de salinidad total del orden de 3.5% [1], con oscilaciones según la localización geográfica y la época del año. A modo de ejemplo, la salinidad correspondiente a la zona de Bahía Blanca, calculada como promedio de determinaciones realizadas durante dieciocho meses, es de 3,37 % [2].



Las mayores concentraciones iónicas son las de Na^+ y Cl^- , que alcanzan los 11.000 y 20.000 mg/litro, respectivamente. También hay cantidades significativas de Mg^{2+} y SO_4^{2-} , normalmente 1.400 y 2.700 mg/litro [3].

Las concentraciones iónicas promedio correspondientes a las aguas del Océano Atlántico son Cl^- : 1,94 %, Na^+ : 1,08 %, Mg^{2+} : 0,13 % y SO_4^{2-} : 0,27 %. También contiene oxígeno y dióxido de carbono disueltos, cuyos porcentajes varían sensiblemente en función de las condiciones locales. [2].

Por lo tanto, el hormigón expuesto a un ambiente marino, se deteriora debido a los siguientes efectos: acción química de los constituyentes del agua de mar sobre los productos de hidratación del cemento, reacción álcali-agregado (si hay agregados reactivos), presión de cristalización de sales en el hormigón en zonas de moja-seca, acción del hielo en climas fríos, corrosión de las armaduras y erosión física debida a la acción de las olas y partículas en suspensión. Cada una de estas acciones provoca un aumento de la permeabilidad del hormigón, lo que contribuye a que progrese el ataque inicial y el de los demás tipos de acción [3]. De todas estas posibles patologías, la corrosión de las armaduras, suele ser la principal causa inicial del deterioro en estructuras de hormigón armado expuestas al agua de mar.

En estructuras emplazadas en ambiente marino, los iones cloruros presentes en el agua de mar, penetran a través de los poros capilares de la matriz cementicia del hormigón de recubrimiento, y parte de ellos se pueden combinar con las fases aluminicas y ferríticas de los cementos para formar complejos de cloroaluminatos, que se fijan como compuestos insolubles. Son los denominados cloruros "ligados" (o fijos) y no generan riesgo de corrosión; a diferencia de los "libres" que difunden en el hormigón quedando sin combinar, y son los que atacan a los productos de hidratación del cemento portland, y destruyen la película pasiva de la superficie de las armaduras.

Cuando la cantidad de cloruros en el líquido de poros supera un umbral crítico de concentración, la película pasiva formada sobre la superficie de las barras, se altera. Se origina así una celda electroquímica en la cual el área alterada actúa como ánodo, y alguna zona pasiva intacta, como cátodo. Si además existen humedad y oxígeno en cantidades necesarias, comienza un proceso de corrosión puntual, denominado crateriforme (pitting). Iniciada la corrosión, y dado el carácter expansivo de los óxidos y la baja resistencia a tracción del hormigón, se generan fisuras, permitiendo el ingreso de otros agentes agresivos. Si éstas tienen suficiente magnitud, se produce el desprendimiento del hormigón de recubrimiento, dejando expuestas las armaduras.

Uno de los mencionados "agentes agresivos" que pueden ingresar y reaccionar con la portlandita, son los sulfatos que originan hidróxidos alcalinos, los cuales tienen una participación activa en la reacción con agregados deletéreos, situación que acelera los efectos de la reacción álcali-sílice (RAS).



Además, el aporte del ión Na^+ contribuye a incrementar la reacción con la sílice lábil, que puede ser amorfa o microcristalina, o con el cuarzo tensionado. A esto se suma un efecto secundario del ión Cl^- que produce una humectación intensa, colaborando en el desarrollo de la RAS [4], si hay presentes materiales considerados potencialmente reactivos tales como variedades de sílice criptocristalina, vidrio volcánico, rocas volcánicas con pastas vítreas y/o cuarzo microcristalino y deformado. Como consecuencia de esta reacción se forma un "gel" de composición variable constituido principalmente por Si, Ca, Na y K, que al absorber agua expande, ejerce una presión uniforme en todas direcciones y genera fisuras típicas en forma de mapa en el hormigón. El agregado afectado por RAS generalmente desarrolla coronas de reacción en la zona de contacto con el mortero, y en ciertas oportunidades, fracturas, las cuales se pueden extender más allá de la interfase.

Algunos autores han concluido que el comportamiento de los conjuntos potencialmente reactivos, es diferente cuando el medio en contacto con el hormigón contiene sales como las que se hallan disueltas en el agua de mar. Inclusive, la acción inhibitoria de puzolanas para el control de la RAS, no es efectiva [4]. Por lo tanto, en hormigones elaborados con agregados reactivos que estarán en contacto con un ambiente marino, se deberá analizar cuidadosamente el proyecto de dosificación para evitar la RAS.

En la ciudad de Bahía Blanca, y en su zona de influencia, se han estudiado diversas estructuras afectadas por esta patología [5, 6, 7]. Debido a que el deterioro que produce este tipo de reacciones es lento, el riesgo de fallas catastróficas es muy bajo. Se generan problemas de servicio, y se pueden exacerbar otros mecanismos de deterioro, como por ejemplo, los relacionados a corrosión por ingreso de cloruros o las exposiciones a sulfatos.

En el presente trabajo se evaluó el estado del hormigón de una estructura de más de veinticinco años de antigüedad, ubicada en ambiente marino, en la zona del puerto de Bahía Blanca (Argentina), la cual presentaba signos de deterioro que podían comprometer el normal funcionamiento.

Materiales y métodos

Se realizó un relevamiento visual del estado de la estructura de hormigón y se observaron signos de deterioro como: fisuras coincidentes con las armaduras y otras que seguían trayectorias aleatorias; óxidos lixiviados de tonalidad rojiza, que teñían la superficie; desprendimiento del recubrimiento y armaduras a la vista; pérdida del mortero con exposición del agregado grueso (Fig. 1).

La parte de la estructura que presentaba mayores signos de deterioro está ubicada en zona de salpicaduras. Allí se relevaron cuatro sectores C1, C2, C3 y C4, en los que se calaron testigos cilíndricos de distintas longitudes en función de las dimensiones y el estado del elemento estructural. Se procedió



de igual forma con algunas piezas ubicadas en zona seca y que no se encontraban tan comprometidas (sector S4 y S5).



Figura 1: Relevamiento de la estructura

Sobre las muestras se realizaron los siguientes ensayos físico-mecánicos: resistencia a la compresión, norma IRAM 1551 [8]; densidad, absorción y espacios vacíos, según lo establecido en norma ASTM C642-97 [9]; determinación de cloruros totales y solubles en agua, según norma IRAM 1857 [10]; profundidad de carbonatación y determinación de la capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido, según norma IRAM 1871 [11].

Complementariamente, se realizó un estudio petrográfico del hormigón y de los agregados con el propósito de evaluar la presencia de especies deletéreas que pudieran haber reaccionado con los álcalis. Se analizó el contacto hormigón-armadura, y se evaluaron los productos de reacción por DRX.

Para el estudio petrográfico se utilizó un sistema microscópico, con procesador de imágenes integrado con un estereomicroscopio Olympus trinocular SZ-PT; microscopio petrográfico Olympus trinocular B2-UMA, con una cámara de video Sony 151 A incorporada, monitor de alta resolución, procesador de imágenes Image Pro Plus versión 3.1 y programas



computarizados para tratamiento de imágenes y cuantificaciones. Para el estudio de los productos de neoformación se trabajó con un difractor de rayos X Rigaku, D-Max IIIC con monocromador de grafito con 35 Kv y 15 mA.

Resultados y discusión

Ensayos físico-mecánicos

El hormigón de los testigos presentaba una buena distribución de agregado grueso, constituido por canto rodado, de tamaño máximo nominal 25 mm. Se observaron partículas fracturadas, con fisuras que se continuaban en el mortero, y otras con coronas de reacción en la interfase con la pasta cementicia. Algunas muestras tenían fisuras que comenzaban en la superficie y se continuaban hacia el interior, lo que indica que no eran superficiales. En estos casos, los testigos no se pudieron acondicionar para realizar el ensayo de compresión. En otros casos, al calar el testigo se desprendía el hormigón de recubrimiento, dejando a la vista una capa de óxidos (Fig. 2).



Figura 2: Testigos extraídos

En la Tabla 1 se detallan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión realizados sobre los testigos extraídos en cada uno de los sectores relevados. Cada valor indicado en la tabla es promedio de tres determinaciones.



Tabla 1 - Resistencia a compresión

Sector	Resist. promedio a compresión (Mpa)
C1	19,3
C2	17,2
C3	16,9
C4	18,5
S4	22,7
S5	22,1

De la evaluación de los resultados de resistencia a compresión se puede decir que los correspondientes a la zona de moja-seca son menores que los obtenidos en las muestras caladas en la zona seca. En todos los casos se considera que son inferiores a los que debería tener una estructura ubicada en ambiente marino.

Los resultados de las determinaciones de densidad (saturado superficie seca), absorción y porosidad del hormigón de los testigos extraídos en cada sector, se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2: Densidad, Absorción y Porosidad

Sector	Densidad (g/cm³)	Absorción (%)	Porosidad (%)
S4	2,39	6,8	15,2
S5	2,46	7,0	16,0
C3	2,40	6,9	15,5
C4	2,42	7,7	14,1

Estos valores no reflejan diferencias apreciables entre los sectores estudiados. En todos los casos, los valores de porosidad son elevados [12], e indican un hormigón que verá comprometida su durabilidad debido a la facilidad que presenta el ingreso de sustancias nocivas desde el medio exterior, en particular, de cloruros ya que se trata de un ambiente marino.

La determinación de cloruros totales y libres (referidos al peso del hormigón) se realizó en el sector C4, para dos profundidades diferentes, la primera desde la superficie hasta una profundidad aproximada de 5 mm y la segunda, desde 5 mm hasta 10 mm. Los resultados se detallan en la Tabla 3.



Tabla 3: Penetración de cloruros

Sector	Prof. (mm)	Cloruros Totales (%)	Cloruros libres (%)
C4	0-5	0,292	0,289
	5-10	0,185	0,147

Se observa que el contenido de cloruros totales y libres (solubles en agua) para cada una de las muestras, son similares. Se puede suponer que tienen un ingreso posterior al fraguado del hormigón y que no se han fijado en la estructura, o bien, que al ser incorporados con alguno de los componentes del hormigón se hayan fijado y posteriormente, la pérdida de alcalinidad por carbonatación o la presencia de sulfatos, haya originado la liberación de los cloruros fijos. Desde el punto de vista de la durabilidad de las armaduras de refuerzo, un elevado porcentaje de cloruros libres es la situación más comprometida, ya que son éstos los que están disponibles para participar del proceso corrosivo. En lo que respecta al perfil de ingreso de cloruros, se observa una concentración mayor en la superficie que en el interior, lo cual indica claramente el proceso de difusión.

La profundidad de carbonatación medida por teñido con solución de fenolftaleína, se indica en la Tabla 4.

Tabla 4: Profundidad de carbonatación

Sector	Profundidad de carbonatación (mm)
C1	25
C2	15
C3	28
S4	9

La carbonatación se presenta en mayor profundidad en la zona de salpicaduras. En algunos casos este proceso supera el espesor del recubrimiento que es de 20 mm. En general, los recubrimientos son escasos para el grado de exposición de esta estructura.

Para realizar la determinación de la capacidad (C) y la velocidad de succión capilar (S) de agua del hormigón endurecido, se realizó un aserrado del testigo para obtener una muestra de 5 cm de espesor. El corte se hizo



mediendo a partir de la superficie de exposición. Los resultados se detallan en la Tabla 5 y Fig. 2.

Tabla 5: Velocidad y Capacidad de Succión Capilar

Sector	S ($\text{g/m}^2 \text{s}^{1/2}$)	C (g/m^2)
C1	23,5	7547
S4	7,5	3769
S5	8,1	4211

La velocidad de succión capilar del hormigón, para cada una de las muestras, se calculó como la pendiente de la recta obtenida mediante ajuste por cuadrados mínimos de la serie de puntos correspondientes al intervalo de tiempo comprendido entre 0,1 C y 0,9 C.

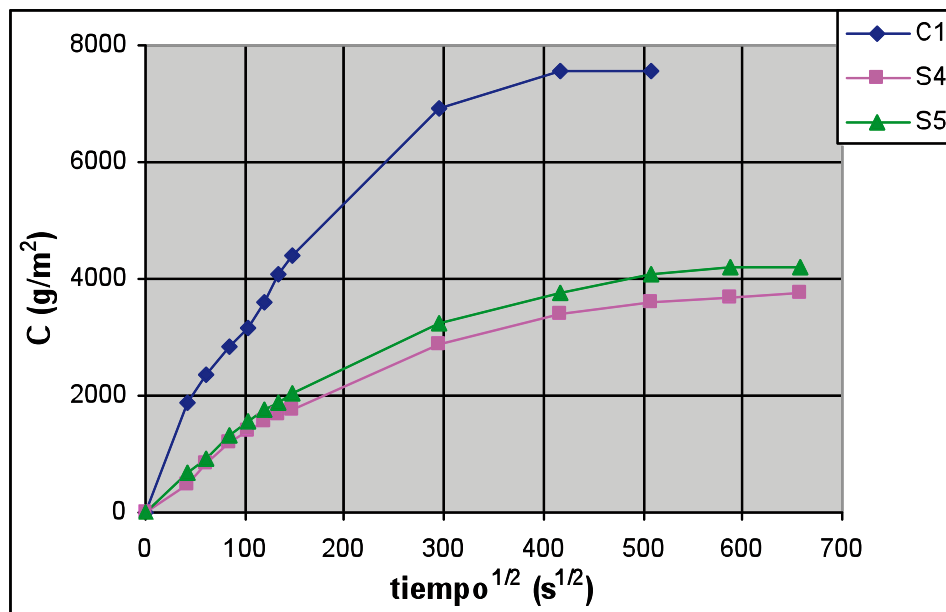


Figura 2: Capacidad de succión capilar

Los resultados de velocidad y capacidad de succión capilar muestran una clara diferencia entre los dos sectores estudiados, los correspondientes a la zona de salpicaduras presentan valores superiores a los de la zona seca. En particular la velocidad de succión capilar de la muestra del sector C1, supera ampliamente el valor límite establecido por el proyecto de reglamento CIRSOC 201-2005 [13] para estructuras expuestas a ambientes agresivos ($4 \text{ g/m}^2 \text{s}^{1/2}$).



a) Agregado grueso:

El agregado grueso es un canto rodado polimíctico, constituido principalmente por rocas volcánicas; en su composición predominan las andesitas sobre las riolitas. Son comunes las pastas vítreas, algunas conservan el vidrio fresco pero es más común que se presente argilizado. Es frecuente observar el desarrollo de coronas de reacción hacia el interior de las partículas como se muestra en la Fig. 3a.

A estas rocas se asocian, en menor proporción, tobas líticas y escasas rocas graníticas, metamórficas, cuarzo y valvas carbonáticas. Entre el material tobáceo predominan las rocas vitroclásticas y las tobas líticas, argilizadas que en muchos casos se han transformado en terrones deleznales.

Las partículas tienen buen redondeamiento y son raras las formas planares. Las superficies de los distintos componentes líticos muestran adherencias y crustificaciones carbonáticas y silíceas.

Aproximadamente entre el 30 y 40% de las partículas del agregado grueso han sufrido procesos de alteración intensa. Las partículas de andesitas y tobas son las más afectadas. Se presentan muy argilizadas, han perdido su textura y modificado sus propiedades físicas. En menor proporción las riolitas fueron alteradas, pero algunos de sus componentes se conservan y presentan evidencias de su textura original.

Las tobas tienen argilizados sus sectores vítreos. La alteración no solo se desarrolla en las pastas externas, también en el interior de algunas partículas.

En la Fig. 3b se observa una partícula de agregado con adherencias superficiales silíceas (de sílice criptocristalina) y carbonáticas, y otro con abundante material de neoformación y coronas de reacción.

b) Agregado fino:

El agregado fino es una arena de composición litológica similar, aunque el contenido de cuarzo es mayor. Está constituido por granos de vulcanitas, tobas, cuarcitas, algunas rocas graníticas y cuarzo. Es escasa la cantidad de calcedonia, mineral que aparece en algunos individuos como cemento de las areniscas. Se observaron trizas de vidrio volcánico alterado, reemplazadas por minerales secundarios.

c) Hormigón:

El proceso de cementación es homogéneo, no se observaron discontinuidades y la porosidad es normal. Algunas cavidades de aire accidental se presentan parcialmente rellenas por carbonato de calcio y alúminosilicatos (ceolitas). Los testigos presentan un fracturamiento transversal al eje del mismo. En todos los casos se observó una adherencia pronunciada,



principalmente de calcita con alúminosilicatos subordinados. Si bien en general se puede asegurar que se disponen sobre la superficie del agregado grueso, a veces atraviesa la partícula, especialmente cuando la misma es una toba. El relleno de las fracturas se realiza por la precipitación de carbonatos, alúminosilicatos y materiales amorfos. En estos sectores se observaron coronas de reacción, mortero con su textura obliterada (Fig. 3c) y tobas muy argilizadas. En algunas muestras el proceso de la reacción se intensifica, con desarrollo de abundante material de neoformación como se observa en la Fig. 3d. En la Fig. 3e se muestra sílice microcristalina y/o amorfa con abundante material de neoformación en el interior de cavidades de aire accidental.

Las partes expuestas (próximos a la superficie de meteorización), muestran un proceso de corrosión importante de la armadura. Alrededor de la barra de acero, se dispone una capa de óxidos oscuros, casi negros compuesta por magnetita (Fe_3O_4). A este mineral lo circunda con una mayor dispersión, una pátina rojiza de hematita (Fe_2O_3), y más alejada, en la matriz cementicea, hidróxidos y oxihidróxidos de hierro. El proceso de corrosión se realiza en presencia de humedad y oxígeno, desarrollándose un aumento de volumen importante, y generando el descascamiento superficial del hormigón de recubrimiento. En la Fig. 3f se muestra el desarrollo del proceso de oxidación del acero y su distribución en el mortero.

Los testigos presentan abundantes fracturas selladas por materiales de neoformación; no tienen dirección preferencial, afectan al mortero, a la interfase y en la mayoría de los casos también al agregado grueso, aunque en forma parcial. Todos los componentes relacionados con estas fracturas presentan fuerte carbonatación y desarrollan coronas de reacción.

En los clastos del agregado es frecuente observar planos de debilidad originales (fracturas, diaclasas, zonas débiles), apropiadas para la circulación del agua y desarrollo de RAS. Las texturas y composición mineralógica de las rocas volcánicas permiten agruparlas como rocas porfíricas, parcialmente afaníticas con cantidades variables de vidrio volcánico fresco y parcialmente desvitrificado.

Difractometría de rayos X

Se separó el producto de neoformación bajo estereomicroscopio para su análisis por difractometría de rayos X. Se identificaron dos ceolitas: una del grupo de la clinoptilolita (Z) y una chabacita de potasio (CH), en menor proporción. La inflexión del gráfico entre 20 y 30° (2θ) se debe a la presencia de material amorfo. Se identificaron además reflexiones correspondientes a cuarzo (Q) y feldespatos (F) que forman parte de los agregados. (Fig. 4).

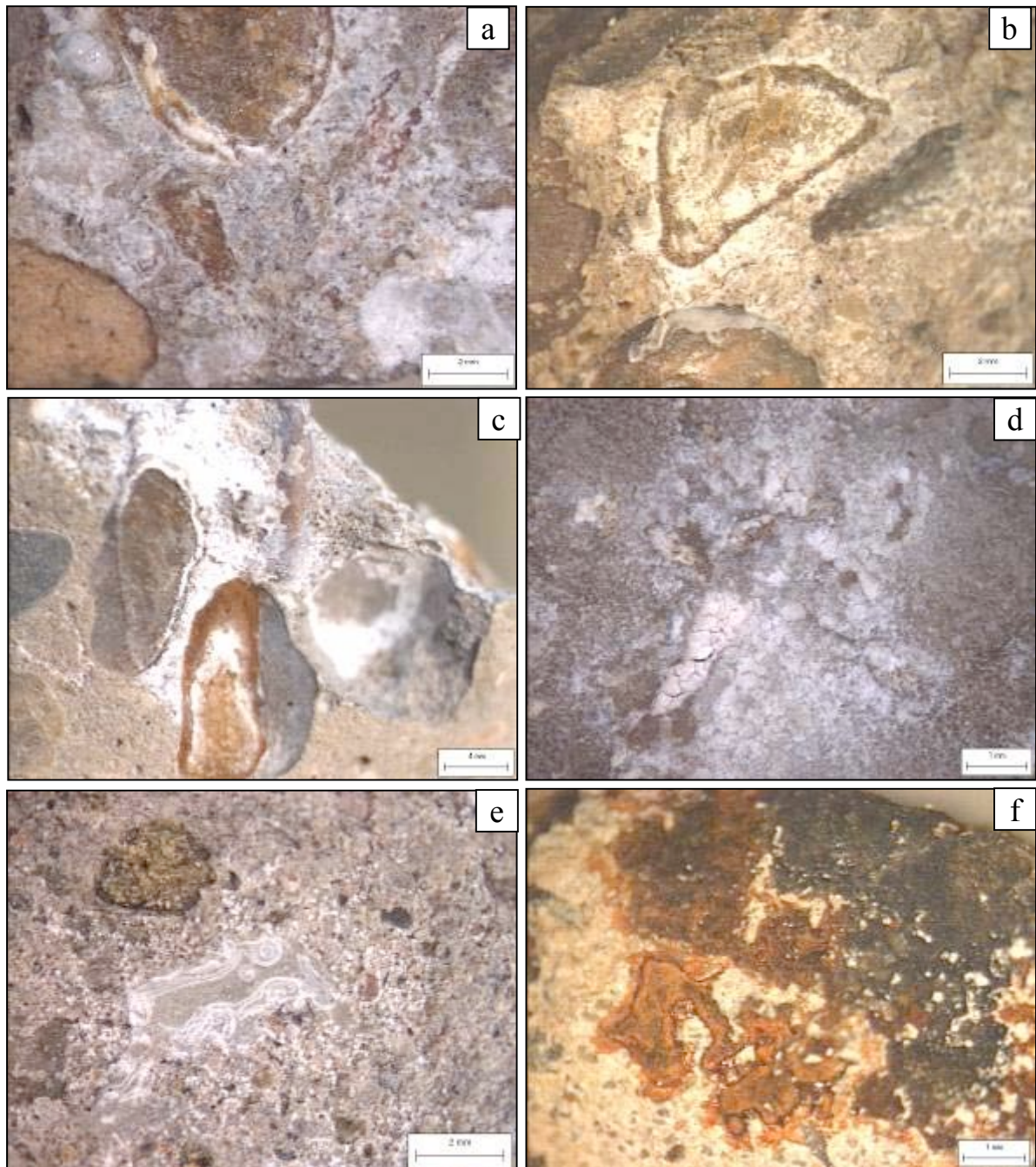


Figura 3a: Desarrollo de coronas de reacción en las partículas de agregado grueso. **b:** Adherencias superficiales silíceas y carbonáticas y coronas de reacción. **c:** mortero con su textura obliterada. **d:** Abundante material de neoformación en las cavidades de aire accidental y en el mortero. **e:** sílice criptocristalina y amorfa. **f:** oxidación del hierro de la armadura y su distribución en el mortero.

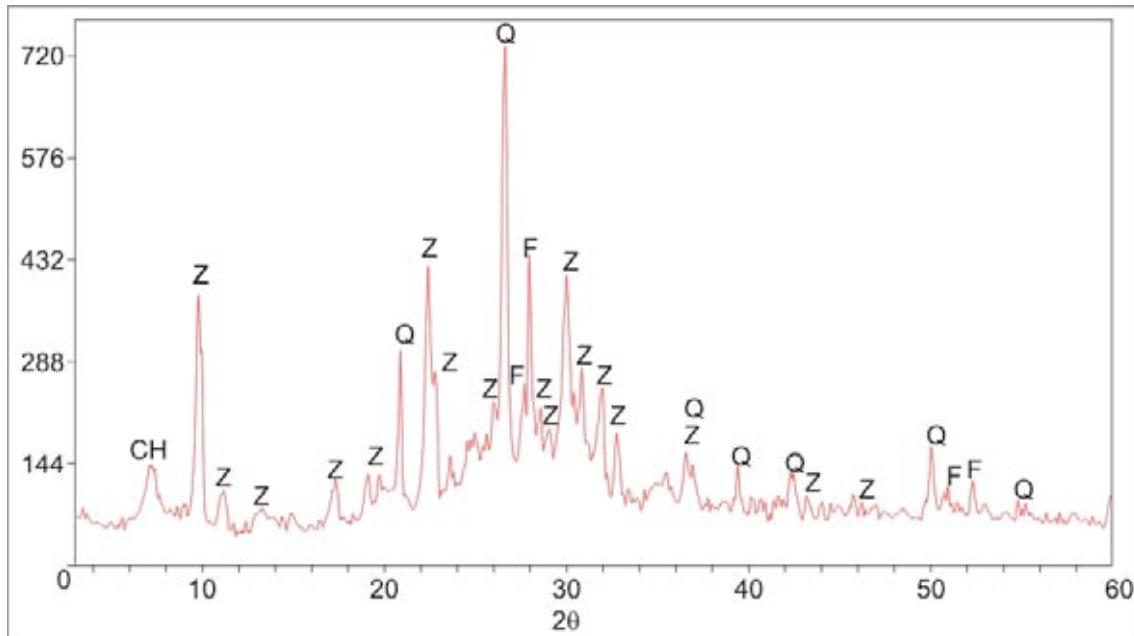


Figura 4: Difractometría de Rayos X del Material de Neoformación

Conclusiones

La patología que presenta esta estructura marítima, es producto de la acción conjunta de errores de diseño, elección de los materiales y un medio ambiente agresivo.

- El insuficiente espesor de los recubrimientos y la elevada porosidad del hormigón, favorecieron la penetración de cloruros que llevaron a la corrosión del acero. Esto se manifiesta en un elevado cuadro de fisuración, exudación de productos de corrosión y desprendimiento del hormigón superficial.
- Las vías de ingreso anteriormente descritas y la presencia de un conjunto potencialmente reactivo, generó el desarrollo de reacción álcali-agregado.
- La presencia de aluminosilicatos (ceolitas), sílice criptocristalina libre y ettringita, son claras evidencias del desarrollo de la RAS.
- Los agregados potencialmente reactivos son las rocas volcánicas con pastas vítreas del agregado grueso y fino, y la calcedonia y vidrio volcánico de la arena.



Agradecimientos

Los autores agradecen al Departamento de Ingeniería, Departamento de Geología y a la SECyT de la Universidad Nacional del Sur, a la CIC y al CONICET por el apoyo brindado para el desarrollo de estas investigaciones y al Sr. Rodolfo Salomón por la colaboración en la compaginación de las fotografías.

Referencias

- [1] M. Á. Bermúdez, P. Alaejos: *Permeabilidad a los cloruros del hormigón armado situado en ambiente marino sumergido*. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 22 N°1 (2007), pp. 15-22.
- [2] L. Traversa: *Corrosión de armaduras en atmósferas rurales, urbanas, marinas e industriales*. Durabilidad del hormigón estructural. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. (2001), pp 217-257.
- [3] P. Mehta, P. Monteiro. *Concrete: structure, properties, and materials*. Prentice-Hall Inc. (1993), pág. 548.
- [4] O. Batic, J. Sota: *El agravamiento de la RAS por el ambiente marino*. Revista Hormigón, N° 22 (1992), pp. 5-12.
- [5] P. Maiza, S. Marfil: *Petrografía del hormigón endurecido: estudio de un pavimento con patologías*. Revista Hormigón, N° 35 (2000), pp. 11-21.
- [6] P. Maiza, S. Marfil: *Examen Petrográfico aplicado al estudio del hormigón de una ruta interurbana con evidencias de deterioro*. Revista de la Asociación de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, N° 17 (2002), pp. 75-79.
- [7] S. Marfil, P. Maiza, R. Salomón: *Pavimentos de hormigón de la ciudad de Bahía Blanca. Su comportamiento frente a la RAS*. Revista de la Asociación de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, N° 16 (2001) pp. 146-152.
- [8] IRAM 1551: *Hormigón de cemento portland. Extracción, preparación y ensayo de testigos de hormigón endurecido*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2000) pág. 12.
- [9] ASTM C642-97: *Standard test method for density, absorption and voids in hardened concrete*. American Society for Testing and Materials. (1997) pág. 3.
- [10] IRAM 1857: *Hormigón de cemento portland. Determinación del contenido de ión cloruro en el hormigón*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2000) pág. 17.



- [11] IRAM 1871: *Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido*. Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2004) pág. 12.
- [12] Manual DURAR: *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo CYTED (1998) pág. 208.
- [13] CIRSOC 201-2005: *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*” Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles, Argentina. (en trámite de aprobación).