### Caracterización de Materiales

Cinperio

# Corrosión del Acero en Vigas con Diferentes Tipos de Agregados Finos

O. A. Cabrera<sup>1,a</sup>, L. P. Traversa<sup>2,b</sup> y N. F. Ortega<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires Av. del Valle 5737- (7400) Olavarría – Argentina.

<sup>2</sup> Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica, Comisión de Investigaciones Científicas, Calle 52 y 121 - (1900) La Plata - Argentina.

> <sup>3</sup> Departamento de Ingeniería - Universidad Nacional del Sur Av. Alem 1253 – (8000) Bahía Blanca – Argentina.

<sup>a</sup> <u>ocabrera@fio.unicen.edu.ar</u>, <sup>b</sup> <u>direccion@lemit.gov.ar</u>, <sup>c</sup> <u>nfortega@criba.edu.ar</u>

**Palabras claves:** arena triturada, forma y textura superficial, hormigón armado, corrosión.

#### Resumen

La influencia del tipo de arena en la corrosión del acero de refuerzo es un tema que no ha sido desarrollado ampliamente en la bibliografía. Las características físicas de los granos de arena (finura, forma y textura superficial) inciden sobre el contenido de agua y/o cemento para obtener una determinada consistencia. Esta influencia modifica la estructura porosa de la pasta, y de este modo, puede afectar el desarrollo de los procesos corrosivos. En cambio, el presente estudio esta orientado a evaluar la influencia del tipo de partícula sobre la corrosión del acero por ataque de cloruros, manteniendo constante la cantidad de pasta y el resto de las proporciones de las mezclas.

El presente trabajo se basó en un estudio experimental sobre el comportamiento de vigas de hormigón armado, elaboradas con cuatro mezclas con diferentes tipos de arenas (3 arenas trituradas, y otra natural usada como referencia), sometidas al ensayo de corrosión acelerada. En las vigas se evalúo el proceso de corrosión en base a las áreas, anchos máximos y longitud de fisuras, la pérdida de masa del acero, y la evolución de los potenciales. La caracterización del hormigón se basó en la determinación de la resistencia, la succión capilar, y la porosidad.

Los resultados muestran un comportamiento diferente entre las vigas que poseen arenas trituradas respecto a la viga realizada con arena natural en



cuanto al tiempo de aparición de la primera fisura, la velocidad del desarrollo de la fisuración y el ancho máximo de fisura. Por otra parte, los valores de los ensayos relacionados con la estructura de poros del hormigón se correlacionan con el grado de corrosión del acero.

## 1.- Introducción

Cinperior 7010

El proceso de corrosión del acero de refuerzo esta gobernado por factores externos como son la presencia de oxigeno, agua, tipo y cantidad de agentes agresivos que definen el ambiente de exposición; y factores internos, como el tipo de acero [1], la estructura del hormigón de recubrimiento, etc. En la mayoría de las causas de deterioro, las sustancias agresivas (iones y moléculas) o el agua deben ser trasladadas hasta donde se encuentra el producto reactivo para poder combinarse, es decir que si no hay transporte no hay ataque. La presencia de agua en estado líquido o gaseoso es condición previa para que las reacciones tengan lugar a una velocidad con cierta repercusión práctica sobre la durabilidad. El agua es indispensable para varios ataques físicos, y un vehículo para el transporte de iones agresivos en los procesos químicos de degradación del hormigón y el acero. Para varios tipos de ataques, como los agregados presentan una muy baja permeabilidad, el ingreso de agentes agresivos se realiza por la pasta, y/o por la interfaz pasta-agregado.

Los mecanismos principales de transporte de masa en el hormigón son la permeabilidad, capilaridad y la difusión. La permeabilidad y la absorción son mecanismos de transportes muy rápidos, mientras que la difusión es mucho más lenta [2-3]. Un cuarto mecanismo es la electromigración, donde los iones se movilizan debido a un potencial eléctrico durante el desarrollo de la corrosión del acero. La preponderancia de uno u otro mecanismo dependerá del tipo de sustancia agresiva, de las condiciones de exposición y del grado de saturación de los poros del hormigón. En general, los parámetros que definen cada mecanismo de transporte están interrelacionados.

El agregado fino puede incidir sobre los mecanismos de transporte afectando indirectamente la calidad de la pasta al modificar la relación *agua/material cementíceo* (*a/mc*), y/o directamente, por los cambios que le imprime a la conformación de las interfaces *"pasta-agregado fino"*, su tortuosidad y favorecidos por el *efecto puente* que se produce entre partículas, cuando las mismas se tocan o si las interfaces se solapan. El agregado fino ocupa un volumen importante en el hormigón, siendo la superficie específica de la arena entre 25 y 40 veces la del agregado grueso. En general, los modelos del hormigón como material compuesto ignoran la interfaz *"pasta-agregado fino"* ya que solo consideran tres fases, el agregado grueso, el mortero y la interfaz entre estos dos [4]. Además, el volumen de interfaz *"agregado-pasta"* afecta entre un tercio y la mitad del volumen total de la pasta endurecida [5]. Y se debe tener en cuenta que la influencia del tipo de agregado fino sobre los procesos de corrosión no ha sido abordada en la bibliografía.

Por otra parte, los principales atributos de una partícula de agregado son la forma y la textura superficial. El área superficial de la partícula es un valor que depende de la forma y textura superficial cuando el tamaño de la misma ha sido establecido. El concepto de forma de la partícula involucra tres ideas geométricas: la esfericidad, la redondez y la forma. También, se puede incluir junto a las tres anteriores, la textura superficial para completar la morfología de las partículas. En la Fig. 1 se muestran esquemáticamente las diferencias entre las distintas propiedades que hacen a la morfología de la partícula, y a continuación se desarrollan conceptos básicos sobre el particular [6-11].

Cinpervie

La *esfericidad* de las partículas de los agregados depende de la estratificación y de los planos de clivaje de la roca original; y del proceso de trituración, cuando la reducción de tamaño es realizada por medios artificiales. La esfericidad es una medida de la equidimensionalidad de las partículas y varias expresiones matemáticas alternativas existen para cuantificarla, tomando a la esfera como forma de referencia [6].

La *redondez* es la medida del filo o angularidad de los bordes o cantos de una partícula, independientemente de la forma de la misma. Esta característica depende de las resistencias a la compresión y al desgaste de la roca original, y también de las características (tipo, duración, etc.) del desgaste sufrido por las partículas. También, en este caso existen varias fórmulas matemáticas para calcular la redondez [6].

La *textura superficial* de las partículas es el rasgo menor que presenta la superficie, independientemente de su tamaño, su forma o su redondez. Esta característica de las partículas depende de la dureza, del tamaño de grano y de la estructura de poros de la roca de origen. Aquellas texturas superficiales que no permiten la penetración de la pasta en el agregado no favorecen una buena adherencia. La textura superficial es el grado de pulido de la superficie, y tiene en cuenta la rugosidad y el área superficial por unidad de área proyectada.



**Figura 1:** Esquema de una partícula (línea gruesa) y sus componentes de forma (líneas delgadas), redondez (círculos grandes) y textura superficial (círculo menor) [11].

Si bien la evaluación de la forma y textura superficial de las partículas de agregados, puede realizarse con mediciones directas, en las arenas los

métodos de evaluación que generalmente se aplican son indirectos, como p. e., la determinación del volumen de vacíos entre las partículas. Las arenas presentan un amplio rango de formas, de redondeadas a escamosas y alargadas; y de texturas superficiales, de vidriosas a panel de abeja, de acuerdo con la clasificación de la Norma BS 812 [12] (Tablas 1 y 2).

Cinperior 7010

Experiencias realizadas con hormigones con arenas trituradas, muestran que la forma y textura superficial de las partículas tiene una fuerte influencia sobre el estado fresco de los hormigones, que se manifiesta en un incremento del contenido de agua del orden de 25-40 kg/m<sup>3</sup> respecto a hormigones con arenas naturales. Este mayor contenido de agua, cuando el hormigón endurece, se traduce en un incremento de la porosidad. También, los estudios muestran que el contenido de pasta debe ser un 28 % mayor, para disminuir la fricción entre partícula causada por el mayor número de puntos de contacto entre ellas, debido a la forma irregular y la textura superficial más áspera [13].

Textura superficial	Características	Ejemplos
Vidriosa	Fractura concoidal	Pedernal negro, escoria vítrea
Pulida	Desgastado por el agua, o debido a fractura de laminado o roca de grano fino	Cantos rodados, esquistos, pizarra, mármol, algunas riolitas
Granulosa	Fracturas que muestran granos uniformes más o menos pulidos	Arenisca, oolita
Rugosa	Fractura rugosa de roca granular fina -o media- que tiene constituyentes cristalinos que no se pueden ver fácilmente	Basalto, felsita, pórfido, caliza
Cristalina	Contiene constituyentes cristalinos fácilmente visibles	Granito, gabro, gneis
Panel de abeja	Con cavidades y poros visibles	Piedra pómez, escoria espumosa

Tabla 1: Clasificación de la textura superficial de las partículas de agregados [12]	2].
--	-----

Tabla 2: Clasificación de la forma de las partículas de los agregados [12].

Clasificación	Descripción	Ejemplos		
Redondeado	Completamente desgastada por agua o fricción	Canto rodado de río o playa, y arenas del desierto, de playa o de río		
Irregular	Naturalmente irregular, o parcialmente moldeado por fricción y con bordes pulidos	Otros cantos rodados, pedernal		
Escamosa	Material cuyo espesor es pequeño en relación las otras dos dimensiones	Roca laminada		
Angular	Posee bordes bien definidos formados por la intersección de caras planas	Roca triturada de todos los tipos		
Alargada	Material angular en el que la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones			

Patologia e Reabilitação de Estruturas

2, 3 e 4 junho 2010 · Córdoba, Argentina

VI CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE

Escamosa	У
alargada	

Material con longitud considerablemente mayor que el ancho, y este considerablemente mayor que el espesor

En resumen, el aporte significativo de interfaces que origina el agregado fino y la variación en la tortuosidad de éstas interfaces provocadas por los cambio en la forma y textura superficial de los granos, establecen el objetivo del presente trabajo que consiste en evaluar el efecto del tipo de arena sobre la corrosión del acero, en mezclas donde la única variable es el cambio de la morfología de los granos del agregado fino.

# 2.- Materiales, Dosificaciones y Metodología

Cinperior 2010

A continuación se describen los materiales que conformaron al hormigón armado, las dosificaciones y los métodos empleados en evaluar las características del hormigón, y el efecto de la corrosión acelerada.

# 2.1.- Hormigón y acero

Los hormigones del presente estudio contenían como aglomerante un cemento Portland con filler calcáreo (CPF30) y el agregado grueso usado fue una piedra partida granítica con un tamaño máximo nominal de 19 mm. Los agregados finos en estudio fueron tres arenas trituradas 0-6 mm de distintas mineralogías (caliza, dolomítica y granítica), con módulos de finura y contenidos de polvo similares; y otra arena natural silícea, con módulo de finura similar a las anteriores. Las características de los agregados finos se detallan en la Tabla 3. El aditivo superplastificante empleado tenía como materia activa polímeros acrílicos. Los ensayos realizados sobre el hormigón endurecido fueron: resistencia a compresión, succión capilar (IRAM 1871) [14], y porosidad (ASTM C-642) [15].

Tipo de arena / Tamiz IRAM	Caliza (C)	Dolomítica <i>(D)</i>	Granítica <i>(G)</i>	Silícea <i>(AN)</i>
9.50 mm	1	0	0	0
4.75 mm	6	3	0	1
2.36 mm	38	39	28	12
1.18 mm	61	63	56	51
600 µm	75	73	69	74
300 µm	81	78	78	96
150 µm	86	82	84	100
Polvo (<75µm)	10.6	13.3	10.7	0
Módulo de finura	3.48	3.38	3.15	3.33
Densidad relativa	2.68	2.77	2.69	2.64
% Vacíos arena suelta	43 (44)	44 (48)	41 (42)	(42)

 Tabla 3: Granulometría, densidad y características físicas de los agregados finos.

% Vacíos arena compactada	36 (40)	37 (42)	32 (36)	(38)
Forma partículas (BS 812)	Angular	Elongada	Angular	Redondeada
Textura superficial (BS 812)	Rugosa	Rugosa	Cristalina	Pulida

Cinperio

(X) % vacíos de la fracción retenida en el tamiz de 75  $\mu m.$ 

Se dosificaron cuatro mezclas de hormigones, con relación *a/mc* 0.45, y se incorporó el aditivo superfluidificante en aquellas que contenían arenas trituradas para obtener una consistencia de 6 cm. La mezcla que contenía arena natural resultó plástica sin necesidad de incorporar aditivos (Tabla 4). Si bien existió una diferencia en la consistencia se privilegió mantener constante la relación *a/mc*, las proporciones de los materiales y el módulo de finura de las arenas de modo que la única variable fuese el tipo de arena.

Otra alternativa para el diseño de las mezclas era mantener constante la consistencia, pero para las granulometrías empleadas, llevaría a un cambio importante en las relaciones *a/mc* y *"pasta/agregado"*, que dificultarían la comparación de los resultados ante un mayor número de variables. La relación *a/mc* se eligió teniendo en cuenta los valores límites para la mayoría de las clases de exposición que establece el Reglamento CIRSOC 201-05 [16], excepto para los más agresivos (marino sumergido, congelación y deshielo con sales anticongelantes y agresividad química muy fuerte). En Tabla 5 se indican las características de las barras de acero y de los estribos.

	Mezclas				
Materiales	НС	HD	HG	HAN	
Cemento CPF-30	400	400	400	400	
Agua	180	180	180	180	
Agregado fino	798	825	801	786	
Agregado grueso	1000	1000	1000	1000	
Aditivo, %	0.5	0.6	0.5		
Asentamiento, cm	6	6	6	14	

Tabla 4: Dosificaciones empleadas, en kg/m<sup>3</sup>.

Tabla 5: Características de las armaduras.

Armadura	Diámetro (mm)		Límite elástico	Carga última de rotura
	Nominal - Equivalente		(MPa)	(MPa)
Longitudinal	4.20	4.04	730	855
Estribos	2.10	2.10	328	462

#### 2.2.- Vigas de hormigón armado

Las vigas de hormigón armado (de 110x10x15 cm) se construyeron con 4 barras de acero conformado de dureza natural de 4.2 mm de diámetro y con estribos realizados con alambre liso de 2.1 mm de diámetro, con una separación de 10 cm. Las armaduras longitudinales tuvieron un recubrimiento



de 10 mm (Fig. 2). Las vigas y probetas fueron mantenidas sumergidas en agua saturada con cal a  $20 \pm 2$  °C hasta la edad de 28 días.

Con el fin de minimizar las tensiones en las armaduras, se mantuvieron apoyadas en toda su longitud, siendo permanentemente humectados por su parte superior, en una zona intermedia de 50 cm de longitud, con una solución de un 0.3% (en peso) de cloruro de sodio (NaCl), para aumentar la conductividad del medio.



(a) (b) Figura 2: Disposición de la armadura en los encofrados (a), y vigas recién moldeadas (b).

#### 2.3.- Proceso de corrosión acelerada

En los estudios de corrosión del acero de refuerzo se utilizan tres metodologías de corrosión: natural, simulada y acelerada. En la primera se exponen armaduras en ambientes agresivos o se estudian armaduras ya corroídas extraídas de estructuras. Si bien los resultados son representativos, pero es necesario un largo período de tiempo para obtener resultados significativos. En los ensayos de corrosión simulada las probetas se someten a soluciones salinas que simulan determinados ambientes de exposición, aunque sus resultados no siempre se corresponden con los comportamientos observados en estructuras reales. Por lo expuesto, en este trabajo se utiliza el método de corrosión acelerada.

En estos estudios las armaduras se sometieron a un proceso de corrosión acelerada a lo largo de aproximadamente 4 meses, mediante la aplicación de una corriente exterior provista por un galvanostato, cuya densidad inicial es de  $100 \ \mu\text{A/cm}^2$ . En este tipo de ensayo se controló la corriente aplicada, y se pudo obtener diferentes niveles de corrosión en cortos períodos de tiempo. La corriente se aplicó sobre la superficie del hormigón, en la parte inferior de la viga en el sentido de llenado, a través de un contraelectrodo formado por una

malla de acero (de 50 cm de largo y 8 cm de ancho). Sobre el mismo se dispuso una esponja (de iguales dimensiones), que se mantuvo humectada permanentemente con una solución al 0,3 % en peso de NaCl. Esta metodología se ha empleado satisfactoriamente en trabajos anteriores [17,18].

Cinperio 7010

En este trabajo la densidad de corriente aplicada fue de alrededor de diez veces la medida máxima detectada en estructuras de hormigón armado altamente corroídas [19]. De esta manera se obtuvieron penetraciones de ataque de cierta importancia, en tiempos relativamente cortos, sin alterar la naturaleza del proceso. Esta metodología se ha adoptado por otros autores, en distintos trabajos sobre el tema [20-23]. Además, respecto a la densidad de corriente aplicada, se deben tener en cuenta estudios realizados en el Instituto Torroja en los que se aplicaron valores de 1, 3 y 100  $\mu$ A/cm<sup>2</sup>. Estos estudios establecieron que, en comparación con otros parámetros como la relación *"recubrimiento/diámetro"* o la resistencia del hormigón, la influencia de la densidad de corriente aplicada sobre el inicio de las fisuras y el progreso de las mismas fue despreciable [24].

Por otra parte, la aplicación de la solución de cloruros sobre la viga endurecida se adoptó debido a que el acero embebido en el hormigón necesita 7 días para generar la capa pasiva. Entonces, resulta inapropiado efectuar los ensayos añadiendo cloruros con el agua de mezclado ya que el acero no tiene tiempo para pasivarse y, de éste modo, el umbral de cloruros, los productos de corrosión y el tipo de corrosión (localizada o más uniforme), serán diferentes de aquellos en los cuales los cloruros penetran en el hormigón endurecido [24].

Desde el momento en que se aplicó la densidad de corriente se realizó un seguimiento ocular de la superficie de las vigas y registrando el momento de la aparición de las primeras manchas y de las primeras fisuras. A partir del surgimiento de las fisuras, se efectuó periódicamente la medición del largo y ancho de las mismas, para luego calcular las áreas de fisuración. Además, se registraron los potenciales de corrosión, de acuerdo a los procedimientos normalizados con un electrodo de referencia Cu/SO<sub>4</sub>Cu [25]. Posteriormente, se efectuó el descubrimiento de las barras, relevándose su deterioro y finalmente se realizó una gravimetría, para determinar las particularidades de la corrosión registrada en cada caso analizado.

# 3.- Análisis y Discusión de los Resultados

#### 3.1.- Evaluación del hormigón

En la Tabla 6 se presentan los valores obtenidos de las principales propiedades de los hormigones en estado endurecido empleados en las vigas.

Propiedades	Mezclas			
•	НС	HD	HG	HAN

Resistencia 28 días, (MPa)	40	39	38	32
Porosidad, (%)	13.3	13.5	14.0	13.8
Velocidad de succión inicial, (g/m <sup>2</sup> .s <sup>0.50</sup> )				
- a 6 h.	9.51	9.35	9.61	9.99
- a 24 h.	7.32	7.06	7.16	7.99
Velocidad de succión, (g/m <sup>2</sup> .s <sup>0.50</sup> ) (*)	4.32	3.75	3.56	5.05
Capacidad de succión, (g/cm <sup>2</sup> ) (*)	0.387	0.381	0.346	0.374

Cinperior 2010

(\*) valor determinado s/IRAM 1871

- Resistencia a compresión: De la Tabla 6 se puede establecer que la resistencia a compresión de los hormigones con arena trituradas, a los 28 días, fueron de  $39 \pm 1$  MPa. La mezcla con arena natural presentó un valor de resistencia más bajo respecto a los valores medios correspondientes a los que contenían arenas trituradas, del 82 %. En ambos casos, la forma redondeada y la textura superficial fueron responsables, en parte, de este comportamiento, aunque también, la presencia del polvo de la arena pudo modificar las características de los productos de hidratación del cemento.

- *Porosidad:* La porosidad abierta de todos los hormigones estuvo comprendida en 13.6  $\pm$  0.4 %, es decir que el tipo de arena no afectó esta variable al mantener el contenido y calidad de pasta constante, a pesar de la consistencia diferente del *HAN*. Los valores de porosidad se encontraron, de acuerdo con el criterio de calidad del DURAR basado en la porosidad [26], dentro de la categoría de *calidad moderada* (10-15 %).

- Succión Capilar: Como valoración de uno de los principales mecanismos de transporte, asociados a los procesos de corrosión de las armaduras se estudió la succión capilar. La misma presenta dos parámetros básicos, la capacidad que representa la cantidad de agua requerida para producir la completa saturación del hormigón, y la velocidad de succión capilar, que indica la velocidad de penetración del líquido por capilaridad. El gráfico presenta dos zonas, la inicial con mayor pendiente donde el fenómeno esta gobernado por el ingreso de agua en los poros capilares más grande; y otra zona, donde influyen los poros más pequeños y la curva tiene una pendiente menor. En la Fig. 3 se observa el comportamiento en el ensayo de succión capilar [14] de todas las mezclas. En la Tabla 6 se indica un resumen de los valores de la capacidad y de la velocidad de succión capilar a 6 y 24 h., y la calculada de acuerdo con la Norma IRAM 1871.



VI CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS 2. 3 e 4 junho 2010 · Córdoba, Argentina



Figura 3: Ensayo de succión capilar.

La velocidad inicial de succión, durante las primeras 6 h., de las mezclas con arenas trituradas y natural fueron prácticamente iguales. Posteriormente, a las 24 hs. el comportamiento de los hormigones con arenas trituradas fue relativamente similar,  $7.2 \pm 0.14 \text{ g/m}^2 \text{.s}^{0.50}$ , en cambio el *HAN* resultó un 11 % mayor. Considerando los resultados del ensayo de acuerdo con la Norma IRAM 1871, la velocidad de succión capilar del grupo de arenas trituradas fue de 3.9  $\pm 0.4 \text{ g/m}^2 \text{.s}^{0.50}$ , y el *HAN* presentó un valor superior del 30 %.

Si bien la velocidad inicial de succión no se tiene en cuenta en la Norma IRAM 1871, este parámetro es una información interesante en los casos de estructuras expuestas a lluvias, ciclos de mojado y secado, etc., cuando el período de contacto con el agua es relativamente corto. Además, el mismo es considerado en numerosa bibliografía.

Al finalizar el ensayo, luego de 17 días, la capacidad de succión de todas las mezclas fue prácticamente constante,  $0.37 \pm 0.02 \text{ g/cm}^2$ , y no existieron diferencias que se puedan atribuir al tipo de agregado fino o la mayor fluidez del *HAN*.

# 3.2.- Evaluación del comportamiento de vigas de hormigón armado sometidas a corrosión acelerada

Cinperio

- Seguimiento de la fisuración: Los productos de corrosión llevan a un incremento en la presión sobre el hormigón que rodea a las armaduras por tener un volumen mayor que su volumen inicial, de 1.7 a 6.15 veces. Posteriormente, cuando esta presión y la resultante de las tensiones internas alcanzan la resistencia a tracción del hormigón puede comenzar la aparición de fisuras que provoca la disminución de la capacidad portante de los elementos estructurales, como así también su aptitud en servicio. Este proceso disminuye de la vida útil de la estructura, y la aparición de fisuras incrementa la velocidad de corrosión al facilitar el ingreso de las sustancias agresivas.

Por otra parte, se debe tener en cuenta la importancia económica de la corrosión, siendo que los costes directos originados al año por la corrosión alcanzan alrededor del 3,5% del PBI de una nación, y si se aprovecharía mejor la tecnología existente se podría ahorrar aproximadamente un 20-25% de éstos costes [24].

Una forma de analizar el progreso del daño ocasionado en las vigas por la corrosión de las armaduras fue midiendo las *áreas de fisuras* (definida como la sumatoria del ancho por el largo de fisura de cada tramo de dicha anchura) durante el tiempo que duró el ensayo, de un modo acumulativo. La formación de óxidos provocó el crecimiento de las fisuras, tanto en ancho como en largo. El ancho máximo de la fisura no siempre se fue incrementando en la misma zona, sino que fue variando de sector. En la Fig. 4.a se observa el contraelectrodo y una fisura al principio del experimento, en cambio en la Fig 4.b, las fisuras y las manchas de óxido corresponden al final del proceso de corrosión acelerada.



(a) (b) **Figura 4:** Contraelectrodo y fisuras iniciales (a); Fisuras al final del experimento (b).

La aparición y evolución de las fisuras de las vigas se muestran en la Fig. 5, y las vigas con arena triturada presentan un inicio más temprano de la



fisuración respecto a las vigas con *HAN*. La mayoría de las fisuras resultaron ser paralelas a las armaduras principales y se encontraron dentro de la zona humectada con la solución de cloruros. Se realizó una regresión lineal entre los valores de la longitud de fisuras (*L*) y el tiempo (*t*) y en todos los casos resultaron rectas con adecuados coeficientes de regresión (Tabla 7). Al finalizar el ensayo la sumatoria de la longitud de fisuras de cada viga tendió a un mismo valor, 1160  $\pm$  70 mm.

Mezcla	Longitud de fisuras en función del tiempo, (L en mm, y t en días)	R <sup>2</sup>
HG	L = 11.644 · t + 11.800	0.96
HD	L = 11.422 · t + 62.820	0.89
НС	L = 13.046 - t + 66.516	0.89
HAN	L = 13.027 ⋅ t – 73.856	0.94

Tabla 7: Relación entre la longitud total de fisura	as y el tiempo.
---	-----------------



Figura 5: Evolución de la longitud de fisuras en el tiempo.

Respecto a la evolución de los anchos máximos de fisuras se debe tener en cuenta que la medición no se realizó siempre en el mismo lugar, sino que se registró el valor máximo que se fue manifestando en diferentes zonas a medida que transcurrió el tiempo (Fig. 6). Es decir, que el ancho de una fisura no evolucionó en forma homogénea en toda su longitud. Cuando apareció una fisura visible, hubo una liberación de energía, y el crecimiento del ancho en ese lugar fue lento dado que los productos de la corrosión se difundieron fácilmente en esa zona.



La regresión lineal de los resultados del ancho máximo de fisura (*A*) y el tiempo (*t*), (Fig. 6), permitió obtener las ecuaciones que se indican en la Tabla 8 con sus respectivos coeficientes de correlación.

Mezcla	Ancho máximo de fisura en función del tiempo,		
	(A en mm, y t en días)		
HG	A = 0.0123 ∗ t + 0.1014	0.81	
HD	A = 0.0084 ∗ t + 0.2927	0.81	
НС	A = 0.0088 · t + 0.0563	0.88	
HAN	A = 0.0136 - t + 0.0488	0.95	

**Tabla 8:** Relación entre el ancho máximo de fisura y el tiempo.

A los 90 días el valor del ancho máximo de fisura tendió a estabilizarse, y los valores finales de las 4 vigas fueron diferentes, correspondiendo a la viga con *HAN* el mayor valor. En la Fig. 7 se muestra la relación entre el ancho máximo de fisura (al final del ensayo) y la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días, edad en la que comenzó el ensayo de corrosión acelerado. Es decir, en los hormigones de menor resistencia, ante la presión de los productos de hidratación, el ancho de fisura resultó mayor. Comprobándose de este modo que el tipo de arena influyó en el ancho máximo de fisura.



Figura 6: Evolución del ancho máximo de fisura en el tiempo.



VI CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS 2 3 e 4 junho 2010 : Córdoba Argentina



**Figura 7:** Relación entre el ancho máximo final de fisura y la resistencia del hormigón (R<sup>2</sup>=0.88).

En la Fig. 8 se informa el desarrollo de las áreas de fisuras con el tiempo, y se observa que en las vigas con arenas trituradas el comienzo de la fisuración se produjo entre los 12 y 17 días, y para la viga con *HAN*, a los 22. Se destaca que el crecimiento de las áreas de fisuración en el tiempo registró un comportamiento diferenciado para las vigas con arenas trituradas respecto a la viga *HAN*, resultando en este último caso una velocidad de desarrollo del daño menor.

Ajustando por regresión lineal la parte de las curvas de la Fig. 8, en el sector que abarca la mayor parte del tiempo de ensayo (hasta los 90 días), se obtuvo un gráfico similar al del modelo de Tutti [27] que vincula el daño de las vigas con el tiempo. Este modelo ha sido aplicado por varios autores para el cálculo de la vida útil de las estructuras que se resumen en varios manuales [26, 28]. De este modo, se obtuvieron las ecuaciones que vinculan el área de fisuración (*AF*) con el tiempo (*t*) que se indican en la Tabla 9. De dichas ecuaciones se pudo obtener los *tiempos teóricos de inicio de la fisuración* que



muestran una importante diferencia (~10 días) entre el grupo de hormigones con arena trituradas respecto al que contenía *HAN*.

Esta diferencia de comportamiento, se puede atribuir a los cambios en la tortuosidad de las interfaces *pasta-agregado fino*, dado que las otras variables de las mezclas se mantuvieron constante. Una mayor tortuosidad de las interfaces provoca una mayor dificultad en el "movimiento" de los óxidos e hidróxidos que incrementan la presión interna, responsable de la fisuración del hormigón.



Figura 8: Evolución de la fisuración de las vigas de hormigón armado en el tiempo.

Mezcla	<b>Área en función del tiempo,</b> (AF en mm², y t en días)	R <sup>2</sup>	Tiempo teórico de aparición de la primera fisura (días)
HG	AF = 55.258 ∗ t – 1143,7	0.999	21
HD	AF = 55.117 ∗ t – 1129.5	0.999	20
НС	AF = 45.524 ∗ t – 952.46	0.999	21
HAN	AF = 40.223 ∗ t – 1244.9	0.997	31

**Tabla 9:** Relación entre el daño de las vigas y el tiempo.

Por otra parte, en este trabajo no se encontró una relación directa entre el área de fisuración y los otros parámetros evaluados del hormigón, como la resistencia, o la porosidad, o la capacidad de succión capilar.

Al finalizar el ensayo, se extrajeron las barras y los estribos del sector humectado, se limpiaron mediante el decapado químico y se calcularon las pérdidas gravimétricas respecto al peso inicial de las barras. Las Fig. 9. a y b muestran que la corrosión de las barras no fue totalmente generalizada por la



presencia de cloruros, existiendo ataques localizados. Las armaduras inferiores no resultaron afectadas por la corrosión (Fig. 9.c). La pérdida de acero de la parte central de las armaduras y de la parte superior de los estribos estuvo comprendida en  $26.5 \pm 2.5$ %.



(b) (c) Figura 9: Barras corroídas extraídas de las vigas después de finalizado el ensayo (a), estribos corroídos (b) y armadura inferior no afectada (c).

- Potenciales de corrosión: La medida del potencial de corrosión consiste en determinar la diferencia entre el potencial eléctrico entre la barra de acero de refuerzo y un electrodo de referencia (en este caso Cu/SO<sub>4</sub>Cu) que se coloca en contacto con la superficie del hormigón. Sin embargo, estas medidas tienen un carácter cualitativo y pueden tener una difícil interpretación, entonces se emplea una clasificación del riesgo de corrosión tal como el de la Norma ASTM C-642 [15]. El mismo debe ser aplicado con precaución porque se ha desarrollado empíricamente a partir de los datos obtenidos de tableros de puentes americanos expuestos a sales descongelantes. El potencial de la armadura no corroída en continuidad eléctrica con las zonas corroídas se polariza hacia el potencial de estas zonas, con lo que parecería predecir una alta probabilidad de corrosión; el efecto es tanto más marcado cuanto menor es

la resistividad. También influye la disponibilidad de oxigeno: cuando el flujo de oxigeno esta restringido, como en las estructuras sumergidas, se detectan potenciales muy negativos, pero no son indicativos de corrosión [29, 30].

Cinperio 7010

En las experiencia que se analizan, los valores más negativos de potenciales medidos figuran en la Tabla 10, siendo el mayor el correspondiente a la viga con *HAN*. Las vigas con arenas trituradas llegaron al potencial de probabilidad de corrosión mayor al 90 % (-350 mV) a los 18 días, y en cambio, la viga con *HAN* alcanzó dicho valor 9 días después. Este efecto se puede vincular con la aparición de la primera fisura en esta viga, que también ocurrió más tarde que en las restantes. Luego, a partir de aproximadamente del día número 70 se produjo en todas las vigas un efecto pasivante, y al finalizar el ensayo los valores de potencial de todas las vigas fueron prácticamente coincidentes, entre -254 y -278 mV.

Viga con hormigón	Potencial, en mV	Período con probabilidad de corrosión >90 %
HG	-429	Entre el día 18 y el 74
HD	-423	Entre el día 18 y el 70
НС	-411	Entre el día 18 y el 74
HAN	-450	Entre el día 27 y el 70

Tabla 10: Valores menores del potencial de corrosión (CSC).

#### 3.3.- Relación entre el tipo de arena y la fisuración

La penetración de cloruros en los primeros centímetros de recubrimiento del hormigón depende de la succión capilar, pero la penetración a profundidades mayores esta gobernada por la difusión a largo plazo. En una superficie seca, la toma de iones cloruros se produce por absorción; la solución de cloruros se absorbe por las microfisuras y poros vacíos, y penetrando al hormigón por succión capilar. Si la superficie esta húmeda la entrada inicial es por permeabilidad o difusión [31].



VI CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS 2 3 e 4 junho 2010 - Córdoba Argentina



Figura 10: Relación entre el daño final y la velocidad de succión capilar a 24 hs.

De acuerdo con al análisis realizado anteriormente, la morfología de las partículas de agregado fino influyen en la velocidad de succión capilar, es decir en la forma que ingresan los fluidos al interior del hormigón (Fig. 3 y Tabla 6). En las Fig. 10 y 11 se relaciona ésta propiedad del hormigón con el daño medido en las vigas. Efectuando las regresiones correspondientes a las velocidades de succión capilar (*SC, en g/m<sup>2</sup>.s<sup>0.50</sup>*) a 24 hs y la obtenida aplicando la Norma IRAM 1871, y el daño (*AF, en mm<sup>2</sup>*), se obtuvieron las Ec. 1 y 2, respectivamente.

$$AF = -1412.3 * SC_{24} + 13526 \qquad (R^2 = 0.92) \qquad (1)$$
$$AF = -901.85 * SC_{1871} + 6861 \qquad (R^2 = 0.96) \qquad (2)$$



VI CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS 2.3 e 4 junho 2010 : Córdoba Argentina



Figura 11: Relación entre el daño final y la velocidad de succión capilar s/IRAM 1871.

A medida que la velocidad de succión capilar se incrementa el área de fisuras disminuye, en concordancia con lo observado en la Fig. 8, es decir, que la mayor succión capilar esta asociada a una estructura de poros que facilita el movimiento de los productos de corrosión y disminuye las presiones internas. En estas figuras también se demuestra que el tipo de arena influye en los procesos de corrosión de un modo significativo.

Otro análisis efectuado se indica en las Fig. 12 y 13 donde se relacionan las velocidades de crecimiento del área de fisuras (de daño o deterioro, valorada por la pendiente de las rectas de la Fig. 8), y de succión capilar a 24 hs., y la obtenida de acuerdo con la Norma IRAM 1871, respectivamente. El comportamiento que se observa en los dos casos es similar, siendo la velocidad de desarrollo del daño decreciente con el incremento de la velocidad de succión capilar. Este comportamiento se asocia nuevamente a la mayor facilidad de "movimiento" de los productos de corrosión cuando la succión capilar es mayor, disminuyendo la presión interna que origina la fisuración de

las vigas, como es el caso de la viga con *HAN*. Entonces, la velocidad de propagación del daño se ve afectada por el tipo de agregado fino.

Cinperio

Efectuando las regresiones correspondientes a la velocidad de succión capilar (*SC, en g/m<sup>2</sup>.s<sup>0.50</sup>*) a 24 hs. y la obtenida aplicando la Norma IRAM 1871, y la velocidad de crecimiento del daño (*VCD, en mm<sup>2</sup>/día*), se obtuvieron las Ec. 3 y 4, respectivamente.

$$VCD = -16.107 * SC_{24} + 167.94$$
 (R<sup>2</sup> = 0.83) (3)

$$VCD = -10.875 * SC_{1871} + 94.38 \qquad (R^2 = 0.96) \qquad (4)$$



Figura 12: Relación entre las velocidades de deterioro y de succión capilar a 24 hs.



Figura 13: Relación entre las velocidades de deterioro y de succión capilar s/IRAM 1871.

VI CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE PATOLOGIA E REABILITAÇÃO DE ESTRUTURAS 2. 3 e 4 junho 2010 · Córdoba, Argentina

Resumiendo, el comportamiento observado esta asociado con el hecho de que las arenas con mayor rugosidad confieren una mayor tortuosidad a las interfaces que por un lado provocan una menor velocidad de succión capilar, y por otro, ese efecto hace que los óxidos e hidróxidos producidos durante la corrosión de las armaduras se ven dificultados en movilizarse dentro del hormigón, lo que genera una mayor presión interna que provoca una mayor tensión de tracción en los poros del hormigón, y el posterior fisuramiento del mismo.

Se puede establecer que manteniendo constante las proporciones de los componentes del hormigón y el acero, aquellas mezclas que tienen partículas redondeadas, si bien presentan una mayor velocidad de succión capilar también ven reducido el tiempo de aparición de la primera fisura y el daño (medido por el área de fisuración) resulta menor.

### 4.- Consideraciones Finales

Cinperio

Las experiencias y estudios realizados en vigas con hormigones elaborados con arenas trituradas y natural, donde se mantuvieron constantes la relación *a/mc* (0.45), las proporciones de los materiales componentes del hormigón y el módulo de finura de las arenas, permiten efectuar las siguientes consideraciones:

#### Respecto a los hormigones:

- La durabilidad de los hormigones con el 100 % de agregado fino triturado, en aquellos procesos de degradación donde predomina el fenómeno de succión capilar, no se ve afectada respecto a hormigones realizados con arenas naturales, siempre que se controle el contenido y calidad de la pasta de cemento.
- Si bien las mezclas presentan diferencias de consistencia, la velocidad de succión capilar se ve sensiblemente afectada cuando se modifica la forma y textura de las partículas del agregado fino por el cambio de la estructura porosa ante la variación de la tortuosidad de las interfaces, manteniendo constante la granulometría y las proporciones de los hormigones.
- La porosidad y la capacidad de succión capilar de todas las mezclas fueron prácticamente constantes, y no existieron diferencias que se puedan atribuir al tipo de agregado fino o la mayor fluidez del *HAN*.

# Respecto a las vigas de hormigón armado sometidas a un proceso de corrosión acelerado:

- La sumatoria de longitudes de fisuras al final de ensayo fue un valor constante e independiente del tipo de arena, en cambio el ancho máximo final de fisura estuvo relacionado con la resistencia a compresión de cada hormigón y a su vez, ésta última dependió del tipo de arena.

El desarrollo del área de fisuras (daño) en función del tiempo, muestra que los hormigones con arenas trituradas tienen un comportamiento similar, y presenta diferencias con la viga con *HAN* respecto al tiempo de aparición de la primera fisura, la velocidad del desarrollo de la fisuración y el ancho máximo de fisura.

Cinperio

- El inicio de la fisuración fue similar en las vigas con arenas trituradas, y anterior al que ocurrió en la viga con arena natural, en el orden de 10 días.
- Los mínimos valores de potencial que se midieron en las vigas fue prácticamente independiente del tipo de arena.
- El inicio del período de potenciales con probabilidad de corrosión mayor del 90 % muestra una diferencia en días del orden de 11 días entre las vigas de con arenas trituradas respecto a la viga con arena natural, desfasaje similar al que se obtuvo en la aparición de la primera fisura.
- Existe una relación directa entre la succión capilar y el área final de fisuras, a medida que se incrementa el valor de la succión capilar existe una mayor movilidad de los productos de corrosión, de modo que se originan menores presiones internas en el hormigón que rodea a las barras, y en consecuencia, un menor grado de deterioro. Esta relación esta estrechamente ligada al tipo de agregado fino y, específicamente, a la forma y textura que determinan la tortuosidad de la interfaces *"pasta-agregado fino"*, que resultan las vías de ingreso de las sustancias agresivas, cuando la única variable de los hormigones es el tipo de arena.
- Del mismo modo que en la consideración anterior, también se obtuvo que la velocidad de propagación del daño depende del tipo de agregado fino.

# 5.- Referencias

- [1] L. Eperjesi, A. Giovambattista, L. Gassa y M.R. Barbosa: *Caracterización Electroquímica de Diferentes Aceros de Armadura*, Proc. 14<sup>a</sup> Reunión Técnica, AATH, Olavarría, Argentina, (2001), pp.141-148.
- [2] A. Costa and J. Appleton: Case Studies of Concrete Deterioration in a Marine Environment in Portugal, Cement and Concrete Composites, Vol. 24, (2002), pp.169-179.
- [3] M.A. Odriozola Bermúdez: Corrosión en las Armaduras de Hormigón Armado en Ambiente Marino: Zona de Carrera de Mareas y Zona de Sumergida, Tesis Doctoral Univ. Politécnica de Madrid – Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, octubre de 2007.
- [4] C. Goble and M. Cohen: Influence of Aggregate Surface Area on Mechanical Properties of Mortar, ACI Materials Journal, Vol. 96, N° 6, (1999), pp. 657-662.
- [5] A. Neville: Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 94, Nº 1, (1997), pp. 71-74.
- [6] F.J. Pettijohn: Rocas Sedimentarias, 4ª ed., Ed. EUDEBA, 731 p., (1980).

[7] M.C. Powers: *A New Roundness Scale for Sedimentary Particles*, Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 23, (1953), pp. 117-119.

Cinpervi

- [8] W.C. Krumbein and L.L. Sloss: *Stratigraphy and Sedimentation*, Ed. W.H. Freeman and Company, San Francisco, USA, (1955).
- [9] R.L. Folk: *Petrology of Sedimentary Rocks*, Hemphill Publishing Co, Austin, Texas, USA, 182 p., (1974).
- [10] B. Mather: *Concrete Aggregates: Shape, Surface Texture and Coatings,* Significance of the Properties of Concrete, ASTM STP 169-A, Philadelphia, USA, (1966), pp. 415-431.
- [11] E. Masad and J.W. Button: *Unified Imaging Approach for Measuring Aggregate Angularity and Texture*, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 15, (2000), pp.273-280.
- [12] Norma BS 812-Part 1: *Methods for Sampling and Testing of Mineral Aggregates, Sands and Filler: Sampling, Shape, Size and Classification.*
- [13] O.A. Cabrera, H.A. Donza y J. Garay: Ámbito de Aplicación de los Hormigones con Arena Triturada, Proc. Congreso Internacional de Ingeniería Estructural y de Tecnología del Hormigón – Vol. 2, Córdoba, (1993), pp. 379-392.
- [14] Norma IRAM 1871: Hormigón. Método de Ensayo para Determinar la Capacidad y la Velocidad de Succión Capilar de Agua del Hormigón Endurecido, (2004).
- [15] Norma ASTM C-642: Standard Test Method for Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, (1990).
- [16] Reglamento CIRSOC 201-05: *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*. Ed. INTI, (2005).
- [17] N.F. Ortega and R.R. Aveldaño: Analysis of Tensed Reinforced Concrete Beams During the Corrosion Process, The Open Construction & Building Technology Journal, Bentham Publishers, 2, (2008), pp. 243-250.
- [18] R.R. Aveldaño and N.F. Ortega, Influence of Reinforcement Distribution in the Corrosive Process of Reinforced Concrete Beams, Magazine of Concrete Research, Thomas Telford, 61, 3, (2009), pp. 213-220.
- [19] J. Rodríguez, L.M. Ortega y A.M. García, Medida de la Velocidad de Corrosión de las Armaduras en Estructuras de Hormigón, Mediante un Equipo Desarrollado Dentro del Proyecto Eureka EU 401, Hormigón y Acero, Nº 189, (1993), pp. 79-91.
- [20] C. Alonso, C. Andrade, J. Rodríguez, and J.M. Diez: Factors Controlling Cracking in Concrete Affected by Reinforcement Corrosion, Materials and Structures, 31, (1998), pp. 435-441.
- [21] J. Rodríguez, L. Ortega Basagoiti, J. Casal y J.M. Diez: Comportamiento Estructural de Vigas de Hormigón con Armaduras Corroídas, Hormigón y Acero, Nº 202, (1996), pp. 113-131.
- [22] A.T. Acosta and A. Sagüés: Concrete Cover Cracking and Corrosion Expansion of Embebed Reinforces Steel, Proc. 3rd. NACE Latin American Corrosion Congress, (1998), pp. 215-229.
- [23] M.I. Schierloh: Corrosión de Armaduras. Características que Debe Tener el Hormigón para Aumentar la Protección, Tesis de Magíster, Universidad Nacional del Sur, Depto. de Ingeniería, (2002).
- [24] E. Moreno Fernández: Corrosión en las Estructuras de Hormigón: Estudio Experimental de la Variación de la Ductilidad en Armaduras Corroídas



*Aplicando el Criterio de Acero Equivalente*, Tesis Doctoral, Depto. de Ciencia e Ingeniería de Materiales e Ingeniería Química - Universidad Carlos III de Madrid, España, (2008).

[25] Norma ASTM C-876: Standard Test Method for Half-cell Potential of Reinforcing Steel in Concrete, (2000).

Cinperio

- [26] DURAR: Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado, Ed. CYTED-Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, España, (2000).
- [27] K. Tuuti: *Corrosion of Steel in Concrete,* Swedish Cement and Concrete Research Institute, S-100 44, Stokholm, Suecia (1982), pp. 17-21.
- [28] Manual Contecvet: Manual de Usuario para la Evaluación de la Vida Residual de Estructuras de Hormigón. Manual para la Evaluación de Estructuras Afectadas por Corrosión. Grupo Español. (2000).
- [29] BRE Centre for Concrete Construction, (2000), *Corrosion of Steel in Concrete*. Digest 444 (parts 1 to 3). London: CRC.
- [30] BRE Centre for Concrete Construction, (1998), *Corrosion of Reinforcement in Concrete: Electrochemical Monitoring*. Digest 434. London: CRC.
- [31] G. Song and A. Shayan, Corrosion of Steel in Concrete: Causes, Detection and Prediction. State-of-the-art Review, ARRB Transport Research Ltd., (1998), Review Report 4.