

INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS FINOS Y DEL CURADO DEL HORMIGÓN SOBRE LA EVOLUCIÓN DE LA CORROSIÓN DE LAS ARMADURAS

O.A. Cabrera ¹, N.F. Ortega ², M.I. Schierloh ³, L.P. Traversa ⁴ y L. Señas ²

¹ Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires
Av. del Valle 5737– (7400) Olavarría – Argentina. E-mail: ocabrera@fio.unicen.edu.ar

² Departamento de Ingeniería – Universidad Nacional del Sur
Av. Alem 1253 – (8000) Bahía Blanca – Argentina. E-mail: nfortega@criba.edu.ar

³ Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Concepción del Uruguay
Ing. Pereira 676 – (3264) Concepción del Uruguay – Argentina. E-mail: schierlom@frcu.utn.edu.ar

⁴ Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación Tecnológica (CIC-LEMIT),
Calle 52 y 121– (1900) La Plata – Argentina. E-mail: direccion@lemit.gov.ar

Palabras claves: hormigón armado, agregados finos, curado, corrosión.

RESUMEN

El hormigón, especialmente el de recubrimiento, protege a las armaduras de la acción del medio externo, y el mismo resulta sensible a la composición de las mezclas y al tipo de curado. En este trabajo se analiza la vinculación existente entre la microestructura del hormigón, el curado y el proceso de corrosión de las armaduras. Específicamente, se evalúa como el tipo de arena afecta a los parámetros que caracterizan a la microestructura respecto al ingreso de fluidos que tienen una estrecha vinculación con el proceso de corrosión. Se observó que el curado tiene una fuerte influencia en el tiempo de aparición de la primera fisura, la velocidad del desarrollo de la fisuración y el ancho máximo de fisura; y que el tipo de agregado fino modifica la red capilar afectando el comportamiento de las vigas sometidas a corrosión acelerada.

1.- INTRODUCCION

La corrosión de las armaduras de las estructuras de hormigón armado es una de las principales patologías de las estructuras de hormigón, que implica una merma de la seguridad estructural, la disminución de la vida útil y el consumo poco racional de los recursos no renovables que hacen que las estructuras no sean sustentables. El hormigón es el encargado de proteger las armaduras de la acción de los agentes externos por constituir una barrera física y también, por brindar un medio alcalino en el cual el acero permanece pasivo.

Para que los procesos de degradación se desarrollen produciendo un deterioro significativo de las estructuras, en general, es necesario que se produzca el ingreso de agentes agresivos al interior de su masa, por difusión y/o absorción capilar. La velocidad de ingreso de los agentes depende de la calidad y espesor del hormigón

de recubrimiento. Además, entre otras variables, el tipo y concentración del agresivo, la presencia de oxígeno, la humedad y la temperatura influyen en la magnitud del proceso de corrosión. El hormigón de recubrimiento ante un curado defectuoso que no permite la completa hidratación del cemento y la exposición prematura al ambiente, puede presentar propiedades diferentes del resto del hormigón de la estructura, que le dan mayor vulnerabilidad al ingreso de agresivos, dado que la capa externa de hormigón se torna en más porosa, más permeable y con una mayor fisuración.

La capilaridad es uno de los mecanismos de transporte que tiene una importancia significativa, siendo para los líquidos el mecanismo de ingreso más rápido, y la determinación de la capacidad de succión capilar resulta ser uno de los métodos confiables para caracterizar la estructura de poros de modo comparativo. Entonces, la capacidad y la velocidad de succión del hormigón, y particularmente del hormigón de recubrimiento, están asociadas con la durabilidad de las estructuras de hormigón. El método es sensible a los cambios de las características de las mezclas y, particularmente, a las condiciones de curado. Por lo tanto resulta una herramienta eficaz para especificaciones basadas en el desempeño, dependiendo el resultado del contenido de humedad inicial del hormigón. Este ensayo ha sido incorporado en el Reglamento CIRSOC 201-05 [1] como parámetro de diseño de mezclas de hormigón para estructuras expuestas a ambientes agresivos, salvo en el caso de ambientes rurales o con precipitaciones anuales menores de 250 mm. El valor límite establecido de la *velocidad de succión capilar* es de $4,0 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$.

En hormigones con agregados normales, los mecanismos de transporte se producen por los capilares de la pasta de cemento endurecido y la interfaz “pasta-agregado”, siendo esta última una zona de alta porosidad, mediante estos mecanismos pueden penetrar sustancias agresivas para las armaduras, tal es como los cloruros y agua.

El tipo (que determina la forma y textura de los granos) y la finura de los agregados finos inciden sobre la trabajabilidad de las mezclas, por cuanto la fricción entre partículas y la superficie específica pueden incrementar el contenido de pasta, y entonces, afectar a la resistencia y la durabilidad de los hormigones. En resumen, el comportamiento durable del hormigón puede depender, en gran medida, del diseño de la mezcla, la selección de los materiales y del control en la colocación, compactación y curado.

Por otra parte, el curado influye significativamente sobre las propiedades del hormigón endurecido, en la superficie y en el interior de la masa del material, tales como en su resistencia, permeabilidad, resistencia a la abrasión, estabilidad de volumen y resistencia al hielo-deshielo y sustancias anticongelantes. El desarrollo de la resistencia superficial puede reducirse significativamente cuando el curado es defectuoso [2]. En este último caso, la evolución de la hidratación se ve retrasada y/o interrumpida, con menor cantidad de productos de hidratación, y una parte del cemento queda sin hidratarse. La consecuencia de un curado defectuoso que afecta las características de la microestructura del hormigón, se manifiesta en que la porosidad capilar y la conectividad de poros son mayores que si las reacciones de hidratación se hubieran completado. Esta modificación del proceso de hidratación lleva a la reducción de la resistencia y al incremento de la permeabilidad del hormigón del recubrimiento.

En este trabajo se modelaron distintas situaciones relacionadas con el curado que, desgraciadamente, suelen presentarse en la práctica habitual de la construcción. Este es el caso de una estructura de hormigón que se encuentra expuesta a un clima templado ($T = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y $HR \cong 50 \%$), tal que, una vez hormigonada, no se le realiza el curado húmedo normalizado y deseable. La otra situación analizada es la que se presenta en un lugar con temperaturas elevadas y ambiente seco (de $40 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y $HR \cong 13 \%$) y el hormigón tampoco es sometido a un curado húmedo.

Por estos motivos, que afectan a la estructura capilar del hormigón, resulta conveniente analizar la evolución del proceso corrosivo de las armaduras de elementos estructuras, en función de distintas características del hormigón, en este caso se estudió el tipo de agregado fino utilizado y de curado al que ha sido expuesto el hormigón, debido a que estos tienen influencia sobre su estructura porosa y de este modo, pueden afectar el desarrollo de los procesos corrosivos, generados por el ingreso de cloruros.

El presente trabajo experimental estudia el comportamiento de vigas de hormigón armado, elaboradas con diferentes mezclas y luego expuestas a distintos curados, sometidas a ensayos de corrosión acelerada galvanostáticamente. En las vigas se evaluó la evolución de la corrosión, en base a las áreas y a los anchos máximos de fisuras y a los potenciales de corrosión. La caracterización del hormigón se basó en la determinación de la resistencia mecánica, la succión capilar y la porosidad.

Se determinó que existe una fuerte vinculación entre la microestructura del hormigón, con el tipo de arena utilizada y el curado de las muestras. Se pudo comprobar que todo curado que se aleje del normalizado (húmedo), genera una red capilar ampliamente comunicada capaz de absorber, por capilaridad y permeabilidad, cantidades de agua importantes. Se observó que el curado, tiene influencia considerable en el tiempo de aparición de la primera fisura, la velocidad del desarrollo de la fisuración y el ancho máximo de fisura.

2.- MATERIALES, DOSIFICACIONES Y METODOLOGÍA

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

En el presente estudio se informan y analizan los resultados obtenidos sobre vigas de hormigón armado sometidas a un proceso de corrosión acelerado. Para ello se diseñaron dos series de hormigones, la Serie 1 incluye 4 agregados finos (3 arenas naturales de idéntico origen geológico y una arena triturada granítica) con diferentes módulos de finura, 2.30, 2.54, 2.80 y 2.88, respectivamente; y una piedra partida cuarcítica con un tamaño máximo nominal (*TMN*) de 13.5 mm. El cemento empleado fue un cemento Portland normal (CPN40) y la relación agua/cemento (*a/c*) fue de 0.60. En estas mezclas se mantuvo el volumen de pasta constante.

En la Serie 2, los hormigones contenían como aglomerante un cemento Portland con filler calcáreo (CPF30) y el agregado grueso usado fue una piedra partida granítica con un *TMN* de 19 mm. Los agregados finos empleados 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. En las cuatro mezclas se mantuvo constante el contenido de pasta, y la mezcla que contenía arena natural resultó plástica sin necesidad de incorporar aditivos. 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.

Cabe acotar que la forma y textura de las partículas del agregado fino pueden ser evaluadas en forma descriptiva como el criterio que emplea la norma BS 812 para clasificar estas características físicas de las partículas [3]. Las características de los agregados finos utilizados en las dos Series se detallan en la Tabla 1.

Tabla N° 1: Granulometría (en % retenido), densidad y características físicas de los agregados finos.

Tipo de arena / Tamiz IRAM	SERIE 1				SERIE 2			
	Fina Nat. (1)	Triturada (2)	Gruesa Nat. (3)	Mezcla Nat. (4)	Caliza (C)	Dolomítica (D)	Granítica (G)	Silícea (AN)
9.50 mm	0	0	0	0	1	0	0	0
4.75 mm	5	1	5	5	6	3	0	1
2.36 mm	21	20	22	18	38	39	28	12
1.18 mm	30	49	39	31	61	63	56	51
600 µm	38	63	51	47	75	73	69	74
300 µm	48	73	69	58	81	78	78	96
150 µm	88	83	94	95	86	82	84	100
Polvo (< 75 µm)	1	4	1	1	10.6	13.3	10.7	0
Módulo de finura	2.30	2.88	2.80	2.54	3.48	3.38	3.15	3.33
Densidad relativa	2.58	2.63	2.58	2.58	2.68	2.77	2.69	2.64
% Vacíos arena suelta	44	45	44	44	43	44	41	42
Forma partículas (BS 812)	Redondeada	Angular	Redondeada	Redondeada	Angular	Elongada	Angular	Redondeada
Textura superficial (BS 812)	Pulida	Cristalina	Pulida	Pulida	Rugosa	Rugosa	Cristalina	Pulida

El aditivo superplastificante empleado en la Serie 2 tenía como materia activa polímeros acrílicos. Los ensayos realizados sobre el hormigón endurecido fueron: resistencia a compresión (IRAM 1546) [4], succión capilar a las 24 hs, penetración de agua a presión (IRAM 1554) [5] y porosidad (ASTM C-642) [6]. La velocidad de succión capilar inicial de succión 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. En Tabla 2 se indican las características de las barras de acero y de los estribos. En la Tabla 3 se detallan las dosificaciones empleadas, y para la Serie 1 se las denomina con la letra *M* y el correspondiente número de arena (Tabla 1); en cambio, para la Serie 2 se las identifica con la letra *H* seguida por la letra del origen mineralógico de la arena.

Tabla N° 2: Características físico-mecánicas de las armaduras.

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

Tabla N° 3: Dosificaciones empleadas, en kg/m³.

Materiales	Mezclas Serie 1				Mezclas Serie 2			
	M-1	M-2	M-3	M-4	HC	HD	HG	HAN
Cemento portland	300	300	300	300	400	400	400	400
Agua	180	180	180	180	180	180	180	180
Agregado fino	1035	1154	1107	1049	798	825	801	786
Agregado grueso	840	730	767	826	1000	1000	1000	1000
Aditivo, %	0	0	0	0	0.5	0.6	0.5	---
Asentamiento, cm	6.5	6.5	7.0	7.0	6.0	6.0	6.0	14

2.2.- Vigas de hormigón armado

Las vigas de hormigón armado (de 110x8x16 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.

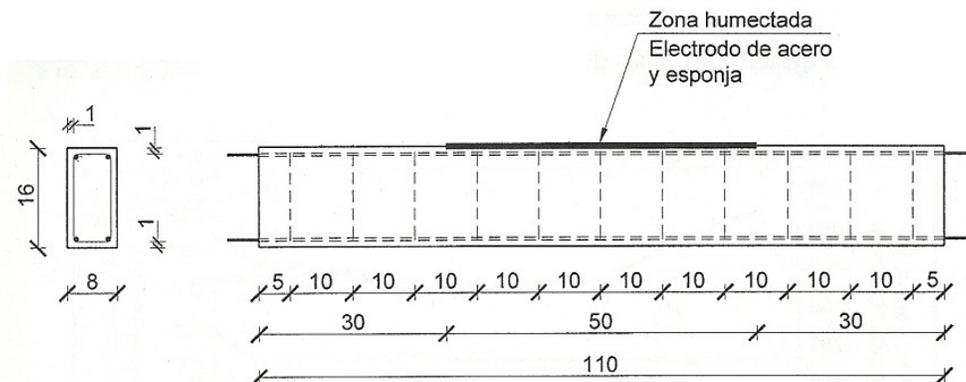


Figura N° 1: Esquema de las armaduras de las vigas, en cm.

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. En la Fig. 1 se muestra un esquema de disposición de las armaduras y estribos, y de la zona humectada.

2.3.- Tipos de curados aplicados a las probetas y vigas

Las probetas y vigas de la Serie 1 se dividieron en tres grupos que fueron curados de la siguiente manera: curado normal (CN, a 20 ± 2 °C y HR > 95 %) durante 28 días, curado en ambiente de laboratorio (CL, a 20 ± 2 °C y HR \cong 50 %) hasta completar 28 días, y curado en mufla (CM, a 40 ± 5 °C y HR \cong 13 %) durante los primeros 7 días, y luego en ambiente de laboratorio hasta los 28 días. Este tiempo de exposición a elevadas temperaturas se consideró que era suficiente, para caracterizar esta situación de curado, debido a que los primeros 7 días son esenciales en la formación de la estructura capilar de hormigón. En cambio, todas las probetas y vigas de la Serie 2 tuvieron un curado normal durante 28 días.

2.4.- Proceso de corrosión acelerada

En este estudio las armaduras se sometieron a un proceso de corrosión acelerada mediante la aplicación de una corriente exterior provista por un galvanostato, con el fin de mantener una densidad de corriente de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. En este tipo de ensayo 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 que se mantuvo humectada permanentemente con una solución al 0,3 % en peso de NaCl. Esta metodología se ha empleado satisfactoriamente en trabajos anteriores [7, 8].

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 [9]. De esta manera se obtuvieron penetraciones de ataque de cierta importancia, en tiempos relativamente cortos, sin alterar la naturaleza del proceso. Esta metodología de trabajo se ha adoptado por otros autores, en distintos trabajos sobre el tema [10-13].

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 [14]. Además, si los cloruros se colocan en la mezcla, los productos de corrosión estarían presionando sobre la masa del hormigón que se encuentra en proceso de endurecimiento, por lo que posee una resistencia mecánica muy baja y esto no es lo que ocurre en las estructuras reales.

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 con una escala graduada con precisión de 0.05mm, 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/SO₄Cu [15]. Posteriormente, se efectuó el descubrimiento de las barras, relevándose su deterioro y finalmente se realizó una gravimetría, para determinar las pérdidas reales de material, en cada caso analizado.

3.- ANALISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

En las Tablas N° 4 y 5 se muestran los valores correspondientes a los principales parámetros del estado endurecido que caracterizan a los hormigones de las dos series en estudio. En base a estos resultados, a continuación se efectúa el correspondiente análisis del comportamiento de los hormigones expuestos a diferentes curados.

Tabla N° 4: Propiedades de los hormigones en estado endurecido, curado normal.

Propiedades	Mezclas Serie 1				Mezclas Serie 2			
	M-1	M-2	M-3	M-4	HC	HD	HG	HAN
Resistencia a 28 días, (MPa)	33	38	25	32	40	39	38	32
Porosidad, (%)	--	--	--	--	13.3	13.5	14.0	13.8
Velocidad de succión capilar a 24 h, (g/m ² .s ^{0.50})	2.89	20.9	17.6	6.7	7.32	7.06	7.16	7.99
Capacidad de succión capilar, (g/cm ²)	0.2	0.90	1.31	0.34	0.39	0.38	0.35	0.37
Penetración agua a presión (cm)	1.5	2.6	2.1	1.3	--	--	--	--

Tabla N° 5: Propiedades de los hormigones de la Serie 1 con curado en laboratorio y en mufla.

Propiedades	Serie 1: curado en laboratorio				Serie 1: curado en mufla			
	M-1	M-2	M-3	M-4	M-1	M-2	M-3	M-4
Resistencia a 28 días, (MPa)	24	23	18	24	17	14	14	19
Velocidad de succión capilar a 24 h, (g/m ² .s ^{0.50})	27.0	36.7	38.8	21.2	30.8	23.1	35.4	35.6
Capacidad de succión capilar, (g/cm ²)	1.33	2.09	2.37	1.08	1.36	1.87	1.80	1.41
Penetración agua a presión, (cm)	9.0	12.2	15.0	15.0	8.4	15.0	15.0	6.7

3.1.- Resultados correspondientes al hormigón y a las vigas de la Serie 1

3.1.1.- Propiedades de los hormigones de la Serie 1

- **Resistencia a compresión:** De las Tablas 4 y 5 y de la Fig. 2 se puede establecer que la resistencia a compresión de los hormigones de la Serie 1 (relación $a/c = 0.60$), a los 28 días, con un curado normal, fue de 32 ± 7 MPa. La mezcla con arena triturada presentó un valor de resistencia superior en un 29% respecto al promedio de resultados de los hormigones con arenas naturales. Este incremento de resistencia se puede asociar a la mejora en la adherencia de los granos de la arena triturada con la pasta de cemento, aunque también la presencia del polvo de la arena triturada pudo modificar las características de los productos de hidratación del cemento.

Los hormigones curados en laboratorio y en mufla presentaron una resistencia de $21 \pm 3,5$ MPa y 16 ± 3 MPa, respectivamente. Es decir, estos resultados mostraron una disminución en la resistencia del 25 al 41 % y del 40 al 62 %, para los mencionados curado respecto a los valores correspondientes al curado normalizado.

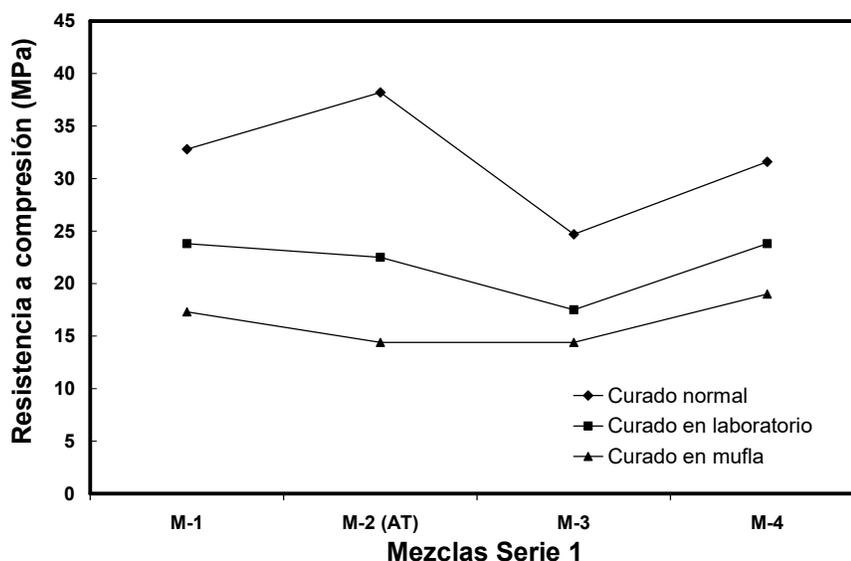


Figura N° 2: Resistencia a compresión de la Serie 1 con diferentes tipos de curados.

- **Penetración de agua a presión:** De la Fig. 3 se puede establecer que los valores de penetración de agua a presión de los hormigones de la Serie 1, a los 28 días con curado normal, fue de 2 ± 0.7 cm. La mezcla con arena triturada presentó un valor de penetración superior en un 59% respecto al promedio de resultados de los hormigones con arenas naturales, a pesar de su mayor resistencia a compresión.

Los hormigones curados en laboratorio y en mufla presentaron una penetración de agua de 12 ± 3 cm y 11 ± 4 cm, respectivamente. Estos resultados mostraron un incremento en los valores de penetración de agua del 470 al 1150 %, y del 515 al 715 %, para los mencionados curados respecto al curado normalizado, evidenciando el efecto del curado defectuoso sobre la penetración del agua.

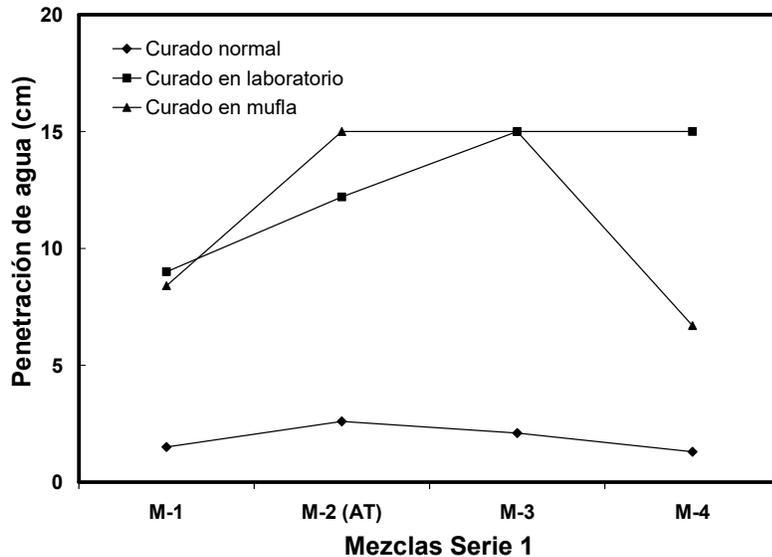


Figura N° 3: Penetración de agua a presión de la Serie 1 con diferentes tipos de curados.

- **Velocidad de succión capilar:** De la Fig. 4 se puede establecer que los valores de velocidad inicial de succión capilar de los hormigones de la Serie 1, a los 28 días con curado normal, fue de $12 \pm 9 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.50}$. La mezcla con arena triturada presentó un valor de velocidad de succión capilar superior en un 230 % respecto al promedio de resultados de los hormigones con arenas naturales.

Los hormigones curados en laboratorio y en mufla presentaron una velocidad de succión capilar de $30 \pm 12 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.50}$ y $30 \pm 10 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{0.50}$, respectivamente. Estos resultados mostraron un incremento en los valores de velocidad de succión capilar del 180 al 930 % y del 200 al 1070 %, para los mencionados tipos de curado, respecto a los valores correspondientes al curado normalizado. En este caso, estos dos tipos de curado afectan de una manera similar el fenómeno de succión capilar del hormigón.

Los parámetros antes analizados que caracterizan al hormigón endurecido, muestran que la penetración de agua y la velocidad de succión capilar a 24 h presentan una gran sensibilidad respecto al tipo de curado. En cambio, los efectos sobre la resistencia del tipo de curado son menores en varios órdenes de magnitud. Esto se puede asociar a que los dos primeros parámetros evalúan fenómenos que afectan la parte exterior de la probeta, en cambio la resistencia es el resultado de la calidad de todo el volumen de hormigón.

Además, se debe tener en cuenta que una pasta de cemento Portland normal con una relación a/c del orden de 0.60 puede bloquear sus capilares con un grado de hidratación del 90 % [16, 17], que se logra en aproximadamente 6 meses, valor lejano de los 28 días del curado normal. La falta de segmentación de los capilares es vital para asegurar una adecuada vida útil de la estructura.

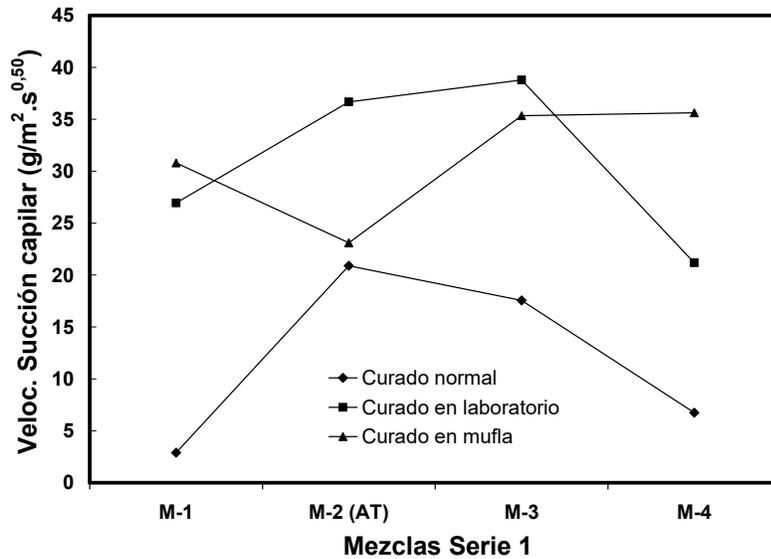


Figura N° 4: Velocidad de succión capilar de la Serie 1 con diferentes tipos de curados.

3.1.2.- Proceso de corrosión acelerada de las vigas de la Serie 1

- **Morfología de las fisuras:** En las Tablas 7, 8 y 9 se muestra la evolución en el tiempo de la morfología típica de la fisuración de las vigas en estudio con curado normal, en sus caras derecha, izquierda y superior; y el rango de los anchos de fisuras para cada edad. En general, las fisuras principales se registraron en las caras laterales y en la dirección de las armaduras principales.

Tabla N° 7: Morfología de la fisuración de la viga M-1 con curado CN cara derecha.

Tiempo (días)	Penetración teórica del ataque (μm)	Cuadro de fisuración	Ancho de la fisura (mm)
0	0		-----
8	26		0.05
29	93		0.05 – 0.1
46	147		0.05 - 0.15
57	182		0.05 - 0.20
74	237		0.05 – 0.25
94	301		0.05 – 0.5

Tabla N° 8: Morfología de la fisuración de la viga M-1 con curado CN cara izquierda.

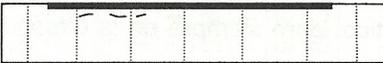
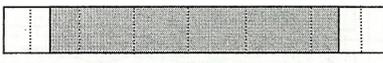
Tiempo (días)	Penetración teórica del ataque (μm)	Cuadro de fisuración	Ancho de la fisura (mm)
0	0		-----
29	93		0.05
46	147		0.05
57	182		0.05 - 0.075
74	237		0.05 - 0.10
94	301		0.05 - 0.15

Tabla N° 9: Morfología de la fisuración de la viga M-1 con curado CN cara superior.

Tiempo (días)	Penetración teórica del ataque (μm)	Cuadro de fisuración	Ancho de la fisura (mm)
0	0		-----
29	93		0.05
46	147		0.05
57	182		0.05 - 0.075
74	237		0.05 - 0.10
94	301		0.05 - 0.15

- **Evolución del área de fisuras de las vigas:** En el caso de la corrosión del acero de refuerzo en estructuras de hormigón armado, es usual expresar la pérdida de masa ocurrida durante el proceso de corrosión como la pérdida radial de la sección de la barra, que se denomina “profundidad media de penetración de la corrosión, PM ” [18, 19]. La ecuación de esta profundidad media, en base a la ley de Faraday, para barras de acero, es la siguiente:

$$PM = R_i - R_t = 0.032 \cdot t$$

(Ec. 1)

Donde: R_i es el radio inicial de la barra (μm); R_t es radio de la barra en el tiempo t (μm); t es el tiempo del ensayo (días); i_{corr} es el valor medio de la densidad de corriente ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) durante el tiempo t , y 0.032 es el factor de conversión de $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ a $\text{mm}/\text{día}$ para corrosión uniforme, considerando una intensidad de corriente de $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. Las pérdidas de radio de las barras se calcularon siguiendo esta ley, es decir que se supuso que la corriente se consumía solo en la corrosión del acero, es decir, con una eficiencia del 100 %. Es decir, que las *PM* calculadas son teóricas.

Una forma de analizar el progreso del daño ocasionado en las vigas por la corrosión de las armaduras, es midiendo las *áreas de fisuras* (definida como la sumatoria de los ancho por el largo de fisura de cada tramo de dicha anchura) durante el tiempo que dura el ensayo, de un modo acumulativo. La formación de óxidos provoca el crecimiento de las fisuras, tanto en ancho como en largo. El ancho máximo de la fisura no siempre se va incrementando en la misma zona, sino que va variando de sector.

Las Fig. 5, 6 y 7 muestran la evolución de la fisuración frente al incremento de la profundidad teórica para las vigas de la Serie 1, con curados *CN*, *CL* y *CM*, respectivamente. Los valores del área de fisuras para las 4 mezclas resultan mayores en el caso del curado normal respecto a los otros curados. Este hecho se asocia a la menor porosidad del hormigón con curado normal que permite que los productos de corrosión ocupen los poros completamente, y de este modo, se incremente la presión interna originada por el mayor volumen de los óxidos respecto al volumen de metal corroído, que origina una mayor fisuración.

Al final del ensayo, la diferencia entre el daño mayor y el menor de las vigas para el grupo con *CN* es de 186 %; y de 467 % y 442 %, para los grupos con curados *CL* y *CM*, respectivamente. Si bien los valores del daño de las vigas, medidos con las áreas de fisuras, son mayores en el caso del *CN*, pero los otros dos tipos de curados producen una mayor dispersión de valores entre las 4 mezclas de cada grupo.

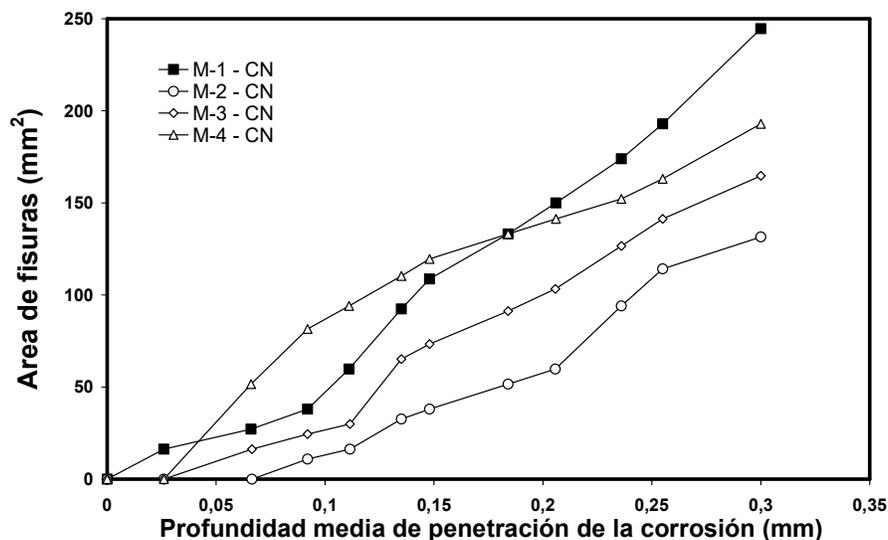


Figura N° 5: Evolución de la fisuración con la *PM* para hormigones de la Serie 1 con curado normal.

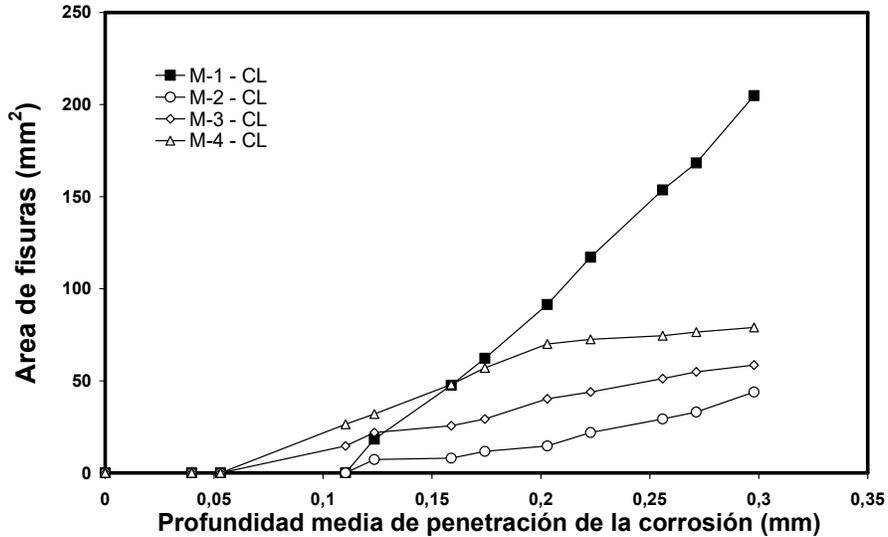


Figura N° 6: Evolución de la fisuración con la PM para hormigones de la Serie 1 con curado de laboratorio.

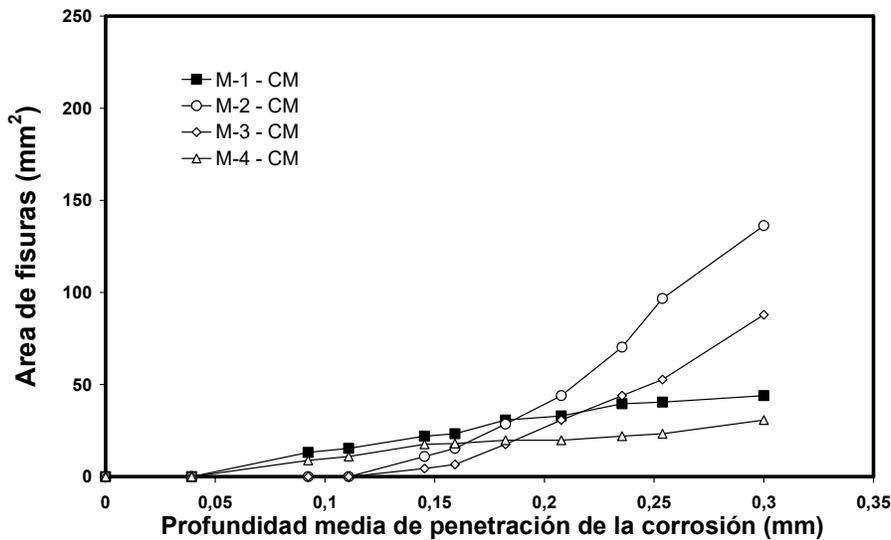


Figura N° 7: Evolución de la fisuración con la PM para hormigones de la Serie 1 con curado en mufla.

Ajustando por regresión lineal la parte de las curvas de las Fig. 5, 6 y 7, en el sector que abarca la mayor parte del tiempo de ensayo (hasta los 110 días), se obtuvo un gráfico similar al del modelo de Tutti [20] que vincula el daño de las vigas con el PM, que depende linealmente del tiempo (período de propagación del modelo de Tutti). Este modelo ha sido aplicado por varios autores para el cálculo de la vida útil de las estructuras que se resumen en varios manuales [21, 22]. De este modo, se obtuvieron las ecuaciones que vinculan el área de fisuración (AF) con la PM que se indican en la Tabla 9, con adecuados coeficientes de correlación (R^2). Además se incluyó en esta Tabla el tiempo aparición de la primera fisura. En las vigas con curado en laboratorio el inicio de la fisuración se produce entre un 130 % y un 350 % más tarde que en el caso del curado normal, y en cambio, con el curado en mufla este retraso fue menor, entre el 170 % y el 190 %.

Tabla N° 9: Relación entre el daño de las vigas y la profundidad media de penetración de la corrosión, en el periodo de propagación.

Mezcla	Curado	Área en función de la PM, (AF en mm ² , y PM en mm)	R ²	Tiempo de aparición de la primera fisura (días)
M-1	CN	AF = 866.7 · PM – 26.14	0.98	8 (100 %)
M-2		AF = 485.3 · PM – 24.92	0.94	21 (100 %)
M-3		AF = 631.8 · PM – 25.37	0.99	21 (100 %)
M-4		AF = 623.3 · PM – 13.03	0.94	8 (100 %)
M-1	CL	AF = 1069.3 · PM – 120.02	0.99	28 (350 %)
M-2		AF = 211.5 · PM – 23.84	0.95	35 (170 %)
M-3		AF = 222.78 · PM – 7.11	0.98	27 (130 %)
M-4		AF = 294.43 · PM – 2.65	0.91	17 (210 %)
M-1	CM	AF = 173.5 · PM – 3.79	0.98	15 (190 %)
M-2		AF = 793.5 · PM – 106.73	0.97	35 (170 %)
M-3		AF = 588.5 · PM – 88.79	0.98	35 (170 %)
M-4		AF = 104.6 · PM – 0.96	0.94	15 (190 %)

Independientemente del curado, las cuatro mezclas presentan al final del ensayo valores de áreas de fisuración diferentes, y en la Fig. 8 se vinculan las áreas de fisuración con la velocidad de succión capilar. Los coeficientes de correlación de las rectas van disminuyendo a medida que el curado es menos favorable, y el correspondiente a todos los resultados de los 3 grupos de vigas es de 0.71. Esta relación muestra que cuando se incrementa la succión capilar, es decir que el material es más poroso o sus poros están más interconectados, la presión que ejercen los productos de corrosión en el interior de ellos disminuye, y en consecuencia disminuye también la fisuración.

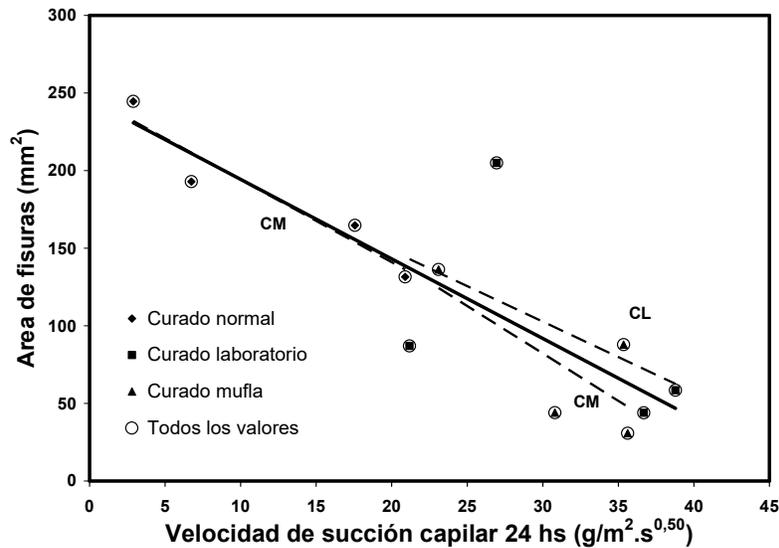


Figura N° 8: Relación entre el área de fisuras y la velocidad de succión capilar.

Por otra parte en la Fig. 9 se muestra la relación entre el daño de las vigas y el módulo de finura de la arena, para los tres tipos de curados estudiados. Para los curados normal y en laboratorio a medida que el módulo de finura disminuye, las partículas son más pequeñas, la superficie específica es mayor y el espesor de las interfaces es menor. De este modo se obtuvieron áreas de fisuras mayores ante una menor presión de los productos de hidratación. En cambio, cuando las probetas se curan a temperaturas del orden de 40 °C, el comportamiento es inverso, debido tal vez al proceso de microfisuración provocado por el secado más agresivo.

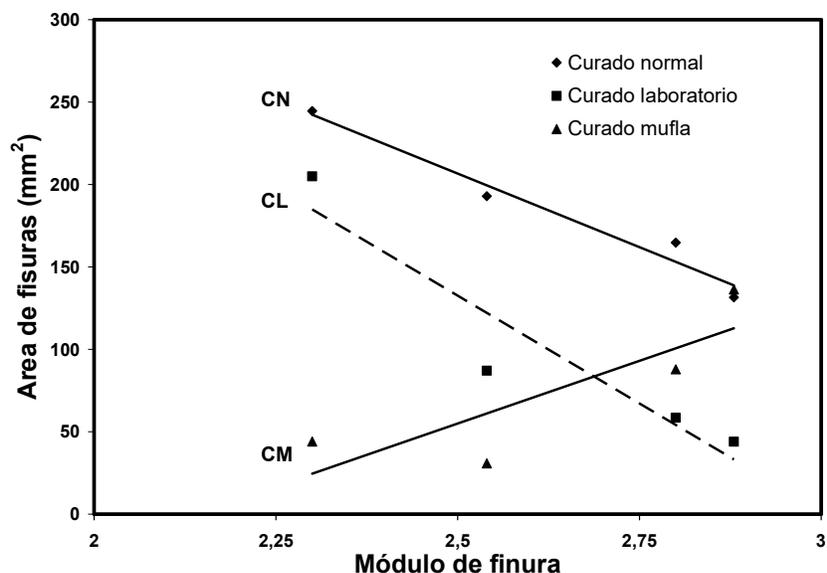


Figura N° 9: Relación entre el área de fisuras y el módulo de finura de las arenas ($R^2 = 0.97-0.89-0.71$).

- **Evolución del ancho máximo de fisuras de las vigas:** Respecto al ancho máximo de fisuras, en las Fig. 10, 11 y 12 muestran la evolución de la fisuración frente al incremento de la profundidad teórica para las vigas de la Serie 1 con curados CN, CL y CM, respectivamente. Los valores del ancho máximo de fisuras para las 4 mezclas resultan mayores en el caso del curado normal respecto a los otros curados. Este hecho se asocia a la menor porosidad del hormigón con curado normal que permite que los productos de corrosión incrementen la presión originada por el mayor volumen de los óxidos respecto al volumen de metal corroído, originando un ancho mayor de fisuras.

Al final del ensayo, la diferencia entre el ancho máximo de fisuras mayor y el menor de las vigas es de 278 % para el grupo con CN; y de 286 % y 227 %, para los grupos con curados CL y CM, respectivamente. Si bien los valores del ancho máximo de fisuras son mayores en el caso del grupo con CN, en los 3 grupos de vigas la dispersión de valores entre las 4 mezclas de cada grupo es del mismo orden.

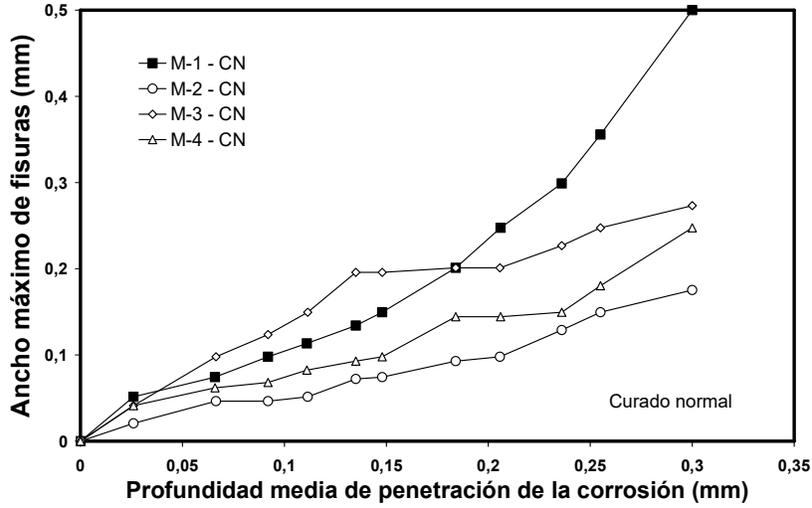


Figura N° 10: Ancho máximo de fisuras vs. PM para curado normal.

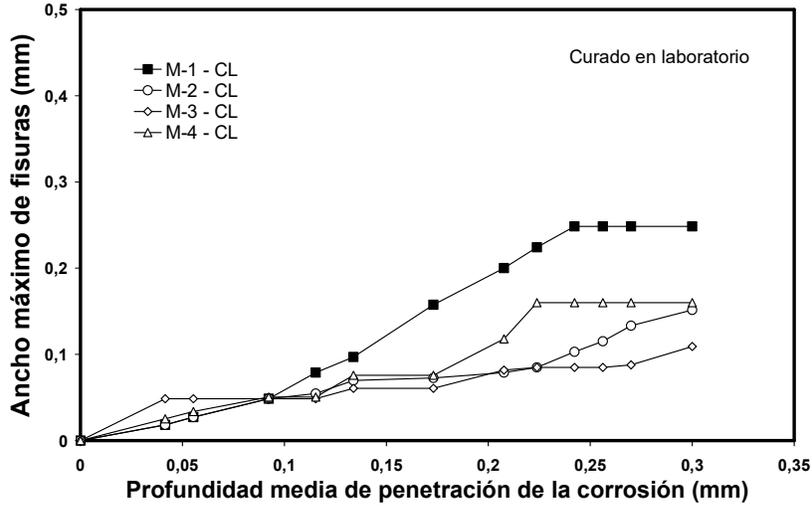


Figura N° 11: Ancho máximo de fisuras vs. PM para curado en laboratorio.

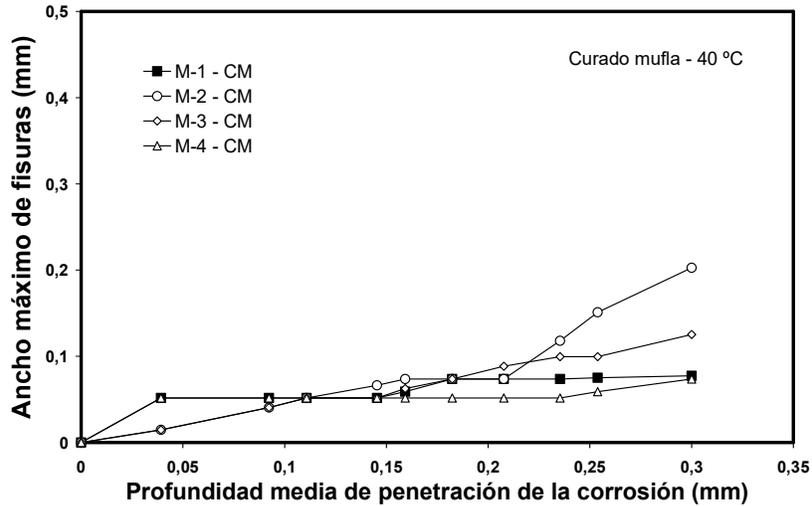


Figura N° 12: Ancho máximo de fisuras vs. PM para curado en mufla.

En la Tabla N° 8 se indican las ecuaciones que vinculan el ancho máximo de fisuras en función de la profundidad media de penetración de la corrosión, para las vigas con diferentes hormigones y tipos de curados. En general, los coeficientes de regresión superan el valor de 0.90 para el curado normal, y disminuyen conforme el curado fue más deficitario.

Tabla N° 8: Relación entre el ancho máximo de fisura y la profundidad media de penetración de la corrosión (PM), potenciales y pérdidas de masa de acero.

Mezcla	Curado	Ancho máximo de fisura en función de PM (A en mm, y PM en días)	R ²	Mínimos potenciales (mV)	Pérdida de peso de acero (gramos - %)
M-1	CN	$A = 1.313 \cdot PM + 0.019$	0.95	- 470	34.3 g (30.8 %)
M-2		$A = 0.557 \cdot PM + 0.002$	0.97	- 480	
M-3		$A = 0.776 \cdot PM + 0.054$	0.92	- 600	
M-4		$A = 0.696 \cdot PM + 0.008$	0.94	- 470	
M-1	CL	$A = 1.045 \cdot PM + 0.029$	0.92	- 560	31.6 g (28.4 %)
M-2		$A = 0.483 \cdot PM + 0.008$	0.88	- 560	
M-3		$A = 0.270 \cdot PM + 0.021$	0.88	- 550	
M-4		$A = 0.632 \cdot PM + 0.010$	0.92	- 500	
M-1	CM	$A = 0.131 \cdot PM + 0.041$	0.80	- 550	36.5 g (32.8 %)
M-2		$A = 0.780 \cdot PM + 0.054$	0.87	- 550	
M-3		$A = 0.452 \cdot PM + 0.010$	0.98	- 540	
M-4		$A = 0.060 \cdot PM + 0.044$	0.45	- 575	

Independientemente del curado, las cuatro mezclas presentan al final del ensayo valores del ancho de fisuras diferentes, y en la Fig. 13 se vinculan los anchos máximos de fisuras con la velocidad de succión capilar. Los coeficientes de correlación de las rectas van disminuyendo a medida que el curado es menos favorable, esto se debe a que las mediciones presentan más dispersión y el correspondiente a todos los resultados es de 0.69. Esta relación muestra que cuando se incrementa la succión capilar, es decir que el material es más poroso o sus poros están más interconectados, la presión que ejercen los productos de corrosión en el interior de los poros merma, y en consecuencia disminuye también el ancho de fisuras.

Respecto a los mínimos potenciales medidos en el grupo de vigas con curado normal el valor promedio correspondientes fue de -505 mV, y para los curados CL y CM fueron de -543 y -554 mV, respectivamente.

Las pérdidas de acero de los 50 cm centrales de las vigas, que incluye la parte superior de los estribos, ocurridas en 95 días de ensayo (Tabla 8), no muestran diferencias importantes para los diferentes curados. Las pérdidas son de 30.8 %, 28.4 % y 32.8 % para los curados CN, CL y CM, respectivamente.

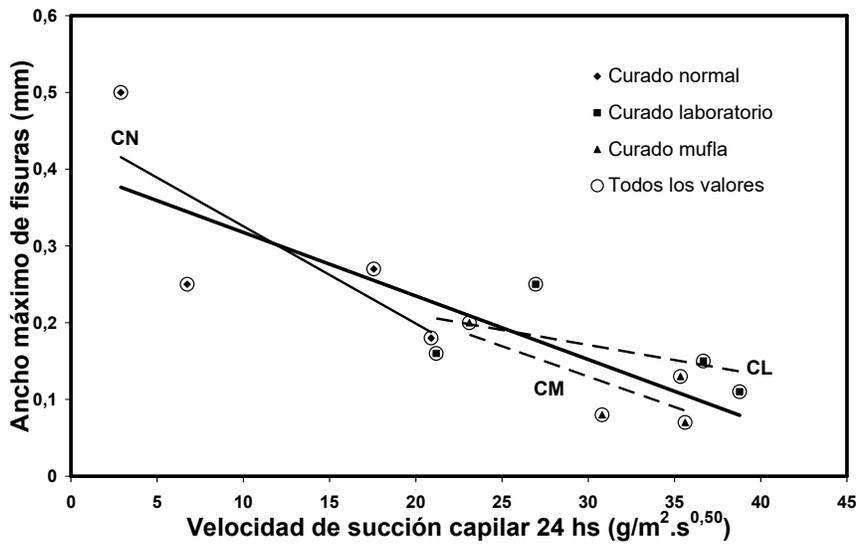


Figura N° 13: Relación entre el ancho máximo de fisuras y la velocidad de succión capilar.

Por otra parte, en la Fig. 14 se muestra la relación encontrada entre el ancho máximo de fisuras de las vigas y el módulo de finura de la arena, para los tres tipos de curados estudiados. Para los hormigones con curados normal y en laboratorio, a medida que el módulo disminuye, las partículas son más pequeñas, la superficie específica es mayor y el espesor de las interfaces es menor. De este modo el ancho máximo de fisuras resulta mayor ante la mayor presión interna. En cambio, cuando las probetas se curan en mufla el comportamiento es inverso, debido tal vez al proceso de microfisuración provocado por el secado a mayor temperatura.

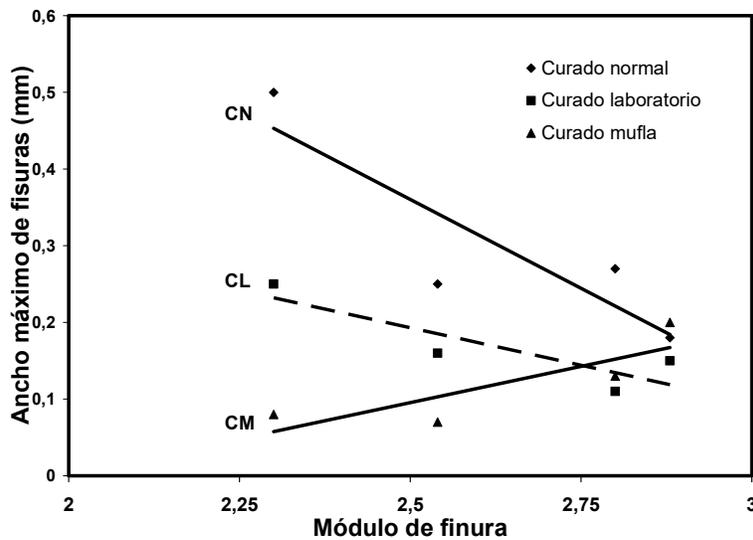


Figura N° 14: Relación entre el ancho máximo de fisuras y el módulo de finura de las arenas ($R^2= 0.78, 0.76$ y 0.70).

3.2.- Resultados correspondientes al hormigón y a las vigas de la Serie 2

El aporte significativo de interfaces que origina el agregado fino y la variación en la tortuosidad de las mismas debido a los cambio en la forma y textura superficial de los granos, fueron los motivos para evaluar en forma complementaria a los estudios anteriores (Serie 1, con relación a/c 0.45) sobre el efecto de la arena sobre la corrosión del acero, en mezclas donde la única variable es el cambio de la morfología de los granos del agregado fino.

3.2.1.- Propiedades de los hormigones de la Serie 2

- **Resistencia a compresión:** De la Tabla N° 4 se puede establecer que la resistencia a compresión de los hormigones con arena trituradas, a los 28 días, fueron de 39 ± 1 MPa. En la mezcla *HAN* se observa un valor de resistencia más bajos respecto a los valores medios que se obtienen con arenas trituradas, del 82 %. En ambos casos, la forma redondeada y la textura superficial son responsables, en parte, de este comportamiento, aunque también, la presencia del polvo de la arena puede modificar las características de los productos de hidratación.

- **Porosidad:** La porosidad de todos los hormigones estuvo comprendida en 13.6 ± 0.4 %, es decir que el tipo de la arena y la diferencia de consistencia no afectan ni la absorción ni la porosidad, al mantener el contenido y calidad de pasta constante.

- **Succión capilar:** Considerando los resultados de los ensayos (Tabla N° 4), la velocidad de succión capilar a las 24 horas del grupo de hormigones con arenas trituradas es de 7.2 ± 0.14 g/m².s^{0.50}, y el *HAN* se encuentra con un valor superior en un 11 %. Al finalizar el ensayo, la capacidad de succión de todas las mezclas es prácticamente constante, 0.37 ± 0.02 g/cm², no existiendo diferencias en éste parámetro que puedan atribuirse al tipo de agregado fino utilizado en la mezcla.

3.2.2.- Proceso de corrosión acelerada de las vigas de la Serie 2

- **Evolución del área de fisuras de las vigas:** En la Fig. 15 se observa la evolución del daño frente al incremento de la profundidad teórica, y se destaca que en el *HAN* la aparición de fisuras se produce más tardíamente (~10 días) que en las vigas con arenas trituradas. En todos los casos las fisuras resultaron paralelas a las armaduras principales.

Por otra parte, 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 (Tabla 4). En la Fig. 16 se presentan la relación lineal entre la velocidad de succión capilar con el daño de las vigas. A medida que la velocidad de succión capilar se incrementa el área de fisuras disminuye, 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 que los mismos originan.

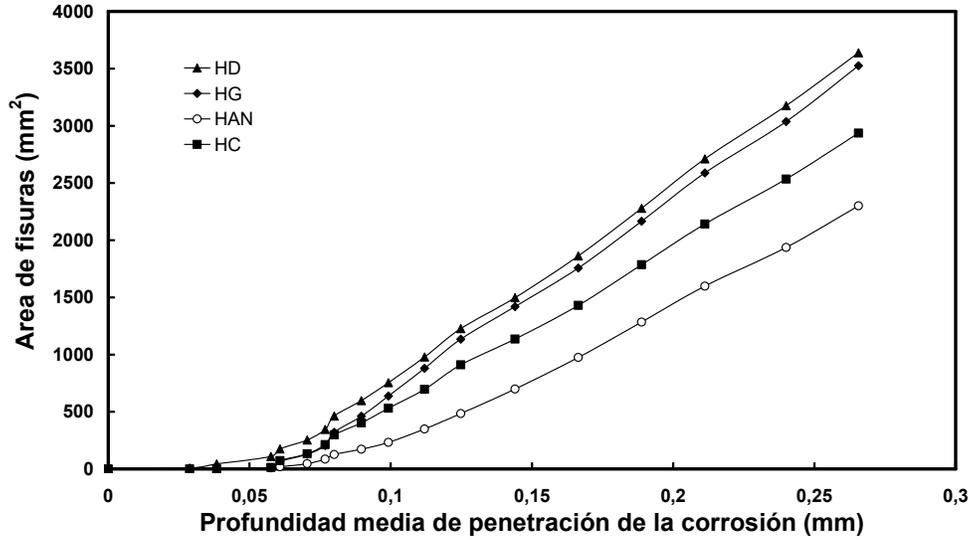


Figura N° 15: Evolución de la fisuración con la profundidad media de penetración de la corrosión.

El comportamiento observado está 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 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 un incremento de la presión interna que provoca una mayor tensión de tracción en los poros del hormigón, y el posterior fisuramiento del mismo.

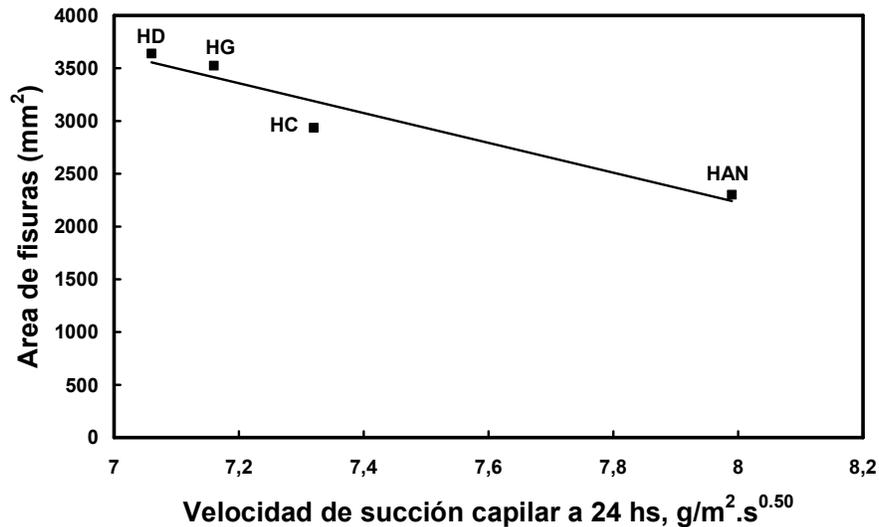


Figura N° 16: Relación entre el daño final y la velocidad de succión capilar ($R^2 = 0.92$).

Respecto a la pérdida de acero, la modificación del tipo de arena no influye significativamente, es decir que prácticamente se produce el mismo volumen de óxido, pero las presiones internas son diferentes. Las pérdidas de acero de la parte

central de las armaduras y de la parte superior de los estribos, medidas por gravimetría, estuvo comprendida en $26.5 \pm 2.5 \%$, y las barras presentaron corrosión no uniforme. Respecto al valor de potencial mínimo medido fue similar para todas las vigas, y estuvieron comprendidos entre -411 y -450 mV, aunque en el *HAN* se alcanzó posteriormente (~ 15 días después).

- Evolución del ancho máximo de fisuras de las vigas: En la Fig. 17 se muestra la relación entre la profundidad teórica de penetración de la corrosión y el ancho máximo de las fisuras. Se comprobó que el ancho máximo de fisura al final del ensayo depende de la resistencia a compresión del hormigón (Fig. 18), la cual esta influenciada, como se indico anteriormente, por el tipo de agregado fino.

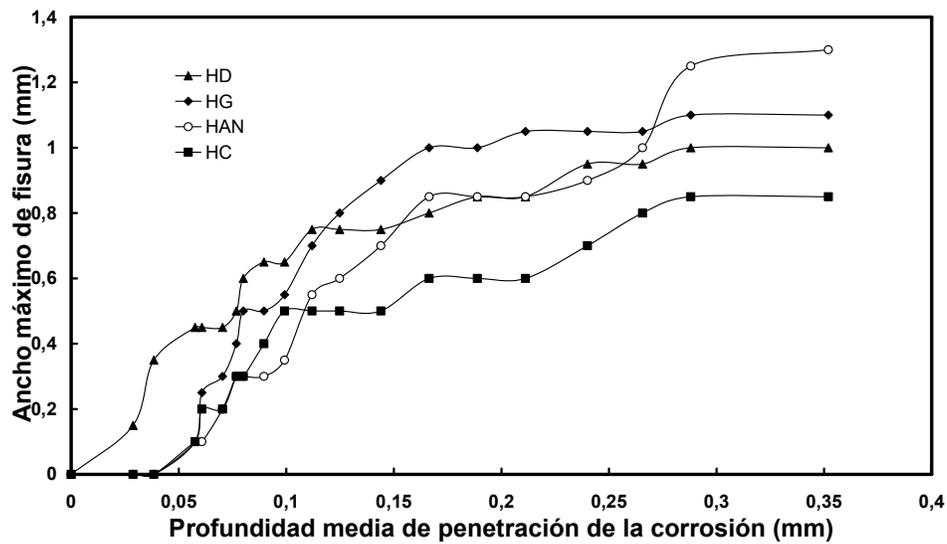


Figura N° 17: Ancho máximo de fisuras vs. profundidad media de penetración de la corrosión.

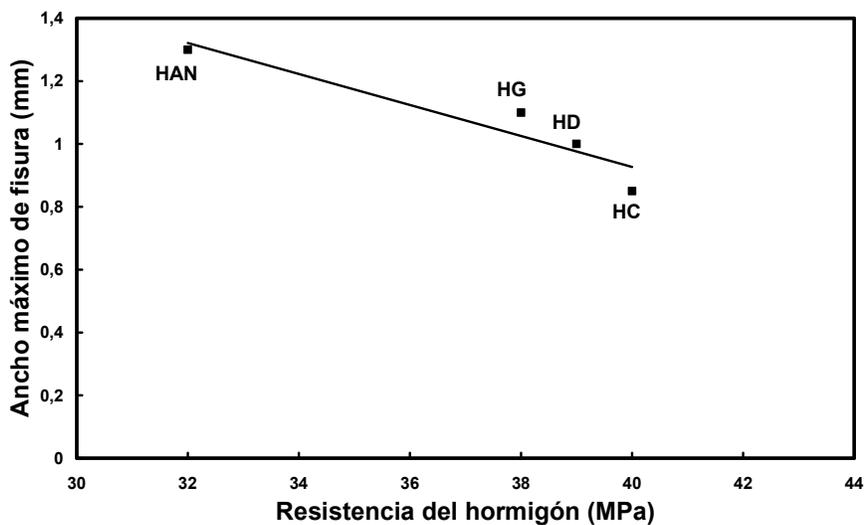


Figura N° 18: Relación entre el ancho máximo final de fisura y la resistencia del hormigón ($R^2 = 0.88$).

4.- CONCLUSIONES

Las experiencias y estudios realizados en vigas con hormigones elaborados con diferentes tipos de agregados finos (naturales y triturados) y distintos tipos de curados, donde se mantuvo constante el volumen de pasta, permitieron llegar a las siguientes consideraciones:

- El tipo de curado influye más fuertemente sobre la penetración de agua y la velocidad de succión capilar, que sobre la resistencia del hormigón, dado que los primeros son fenómenos preponderantemente superficiales.
- En el caso de la corrosión de las vigas de hormigón armado, el curado defectuoso tiene una importante influencia sobre el área de fisuras, y sobre el ancho máximo de fisuras; si bien las fisuras son de menor magnitud, existe una mayor dispersión de resultados entre las mezclas de cada grupo. El curado defectuoso provoca una mayor porosidad y/o interconexión de capilares, que permite disipar la presión de los productos de corrosión, originando un daño menor en el hormigón. Aunque el volumen de acero corroído resultó ser similar, en los tres grupos de vigas.
- Además, en las vigas curadas en ambiente de laboratorio, el inicio de la fisuración se produce entre 14 y 20 días más tarde que en las vigas curadas de modo normalizado; y en cambio, con el curado en mufla, este retraso fue menor, entre 7 y 14 días. En el caso de la Serie 2, vigas expuestas a un curado normalizado, el inicio de la fisuración fue similar en las vigas con arenas trituradas, y anterior al que ocurrió en la viga *HAN*, en el orden de 10 días.
- Para ambas series de hormigones, se comprobó que existe una relación directa entre la succión capilar y el área final de fisuras; de esta manera a medida que se incrementa el valor de la succión capilar, existe una mayor posibilidad de movilidad para los productos de corrosión, de modo que se originan menores presiones internas en el hormigón que rodea a las barras, y en consecuencia, hay un menor grado de deterioro. Esta relación está estrechamente ligada al tipo de agregado fino y, específicamente, a su finura que incide sobre el espesor de la interfaz "*pasta-agregado fino*", y a la forma y textura de los granos, que determinan la tortuosidad de las interfaces que resultan las vías de ingreso de las sustancias agresivas. El efecto del curado sobre esta relación se manifiesta por un mayor coeficiente de correlación cuando el curado es defectuoso.
- De un modo similar, a lo expresado anteriormente, existe una vinculación entre el ancho de fisuras, el tipo de arena y la succión capilar del hormigón.

5.- REFERENCIAS

- [1] Reglamento CIRSOC 201, (2005), "*Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*". Ed. INTI.

- [2] ACI Committe 308R, (2008), *"Guide to Curing Concrete"*, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1, Farmington Hill, USA
- [3] British Standard 812, (1975), *"Part 1: Methods for Sampling and Testing of Mineral Aggregates, Sands and Filler: Sampling, Shape, Size and Classification"*.
- [4] Norma IRAM 1546, (1992), *"Método de Ensayo de Compresión"*.
- [5] Norma IRAM 1554, (1983), *"Método de Determinación de la Penetración de Agua a Presión en el Hormigón Endurecido"*.
- [6] Norma ASTM C-642, (1990), *"Standard Test Method for Specific Gravity, Absorption, and Voids in Hardened Concrete"*.
- [7] Ortega, N.F. and Aveldaño, R.R., (2008), *"Analysis of Tensed Reinforced Concrete Beams During the Corrosion Process"*, The Open Construction & Building Technology Journal, Bentham Publishers, 2, pp. 243-250.
- [8] Aveldaño, R.R. and Ortega, N.F., (2009), *"Influence of Reinforcement Distribution in the Corrosive Process of Reinforced Concrete Beams"*, Magazine of Concrete Research, Thomas Telford, 61, 3, pp. 213-220.
- [9] Rodríguez, J.; Ortega, M. and García, A.M., (1993), *"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, N° 189, pp. 79-91.
- [10] Alonso, C.; Andrade, C.; Rodríguez, J. and Diez, J.M., (1998), *"Factors Controlling Cracking in Concrete Affected by Reinforcement Corrosion"*, Materials and Structures, 31, pp. 435-441.
- [11] Rodríguez, J.; Ortega Basagoiti, L.; Casal, J. and Diez, J.M., (1996), *"Comportamiento Estructural de Vigas de Hormigón con Armaduras Corroídas"*, Hormigón y Acero, N° 202, pp. 113-131.
- [12] Acosta, A.T. and Sagüés, A., (1998), *"Concrete Cover Cracking and Corrosion Expansion of Embed Reinforces Steel"*, Proc. 3rd. NACE Latin American Corrosion Congress, pp. 215-229.
- [13] Schierloh, M.I., (2002), *"Corrosión de Armaduras. Características que Debe Tener el Hormigón para Aumentar la Protección"*, Tesis de Magíster, Universidad Nacional del Sur, Depto. de Ingeniería.
- [14] Moreno Fernández, E., (2008), *"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.
- [15] Norma ASTM C-876 (2000), *"Standard Test Method for Half-cell Potential of Reinforcing Steel in Concrete"*. American Society for Testing and Materials, USA.
- [16] Neville, A.M. and Brooks, J.J., (1998), *"Tecnología del Concreto"*, Ed. Trillas, México.
- [17] Buil, M. and J.P. Olivier, (1992), *"Chapitre: Conception des Bétons: la Structure Poreuse"*, La Durabilité des Bétons. Ed. Presses de l'école nationales des Ponts et Chaussées, Paris.
- [18] Feliú, S., González, J.A., Feliú, S Jr. and Andrade, C., (1990), *"Confinement of the Electrical Signal for in situ Measurement of Polarization Resistance in Reinforcement Concrete"*, ACI Manual Journal, pp. 457-460.

- [19] Song, G., and Shayan, A., (1998), "*Corrosion of Steel in Concrete: Causes, Detection and Prediction. State-of-the-art Review*", ARRB Transport Research Ltd., Review Report 4.
- [20] Tuuti, K., (1982), "*Corrosion of Steel in Concrete*", Swedish Cement and Concrete Research Institute, S-100 44, Stockholm, Suecia, pp. 17-21.
- [21] DURAR: "*Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*", (2000), Ed. CYTED-Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo, España.
- [22] 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*", (2000), Ed. Grupo Español.