

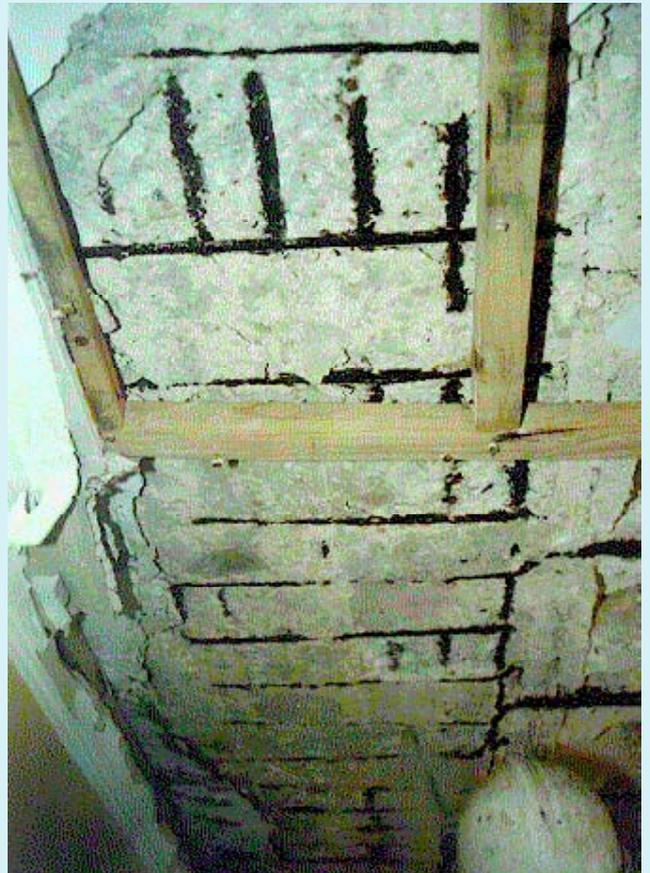
# Estructuras de Concreto

## Proyectar para la Durabilidad

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene



Seccional Colombiana del ACI



# Estructuras de Concreto

## Proyectar para la Durabilidad

### Resumen

En los últimos años ha crecido el número de estructuras de concreto reforzado con problemas de corrosión de las armaduras, como consecuencia del envejecimiento de las construcciones existentes. La pérdida de protección natural ofrecida a la armadura por el recubrimiento de concreto, puede ocurrir a través de diversos mecanismos, siendo preponderantes la despasivación por carbonatación y el ataque de los iones cloruros. En ambos casos, la mayoría de veces, todo el componente estructural es atacado por el medio ambiente externo, sin embargo la manifestación de la corrosión se da solamente en algunos puntos, muy localizados, como resultado de la propia naturaleza del proceso de corrosión electroquímica, donde regiones anódicas se alternan con regiones catódicas.

En este trabajo se presentan los conceptos actualmente adoptados para prevenir la evolución del deterioro de las estructuras de concreto armado, a través de modelos de comportamiento que permiten proyectar para la durabilidad, al mismo tiempo que hacen posible una evaluación de la vida útil de las estructuras de concreto ya expuestas por años a determinados ambientes agresivos.

### Introducción

El estudio de la durabilidad de las estructuras de concreto armado y pretensado ha evolucionado durante los últimos años, gracias al mayor conocimiento de los mecanismos de transporte de líquidos y gases agresivos en el concreto, que hacen posible asociar en el tiempo los modelos matemáticos que expresan cuantitativamente esos mecanismos y, consecuentemente, permiten evaluar la vida útil de una estructura expresada en número de años y ya no en criterios subjetivos del tipo "más o menos adecuada" para un cierto grado de exposición.

El principio básico no se ha alterado. Se requiere, por un lado, conocer, evaluar y clasificar el grado de agresividad del ambiente y, por otro, conocer el concreto y la estructura, estableciendo entonces una correspondencia entre ambos, es decir, entre la agresividad del medio y la durabilidad del concreto de la estructura.

La resistencia de la estructura de concreto reforzado dependerá, tanto de la resistencia del concreto, como de la resistencia de la armadura. Cualquiera de las dos que se deteriore, comprometerá la estructura como un todo. Los principales agentes agresivos de la armadura, el gas carbónico

CO<sub>2</sub> y los cloruros Cl<sup>-</sup>, no son agresivos para el concreto, o sea que su ataque no es deletéreo. Por otro lado los agentes agresivos para el concreto, como los ácidos, que contribuyen a la reducción del pH y al consecuente riesgo de despasivación de la armadura, así como los sulfatos y la reacción álcali-agregado, los cuales generan reacciones expansivas que destruyen el concreto de recubrimiento y protección de la armadura, actúan en conjunto, atacando principalmente el concreto y secundariamente el acero de refuerzo.

Por lo tanto, a pesar de que no existe una normalización al respecto, es necesario y conveniente una separación nítida y la consecuente clasificación entre ambientes preponderantemente agresivos para la armadura y para el concreto. De igual manera, la composición del concreto, o sea, la proporción y naturaleza de los materiales que lo componen, debe ser tratada por separado, cuando se deba elaborar concretos resistentes a medios agresivos para la armadura y concretos resistentes, preponderantemente, a medios agresivos para el mismo concreto.

### Concepto de Durabilidad

En la mayoría de documentos actuales sobre el tema de la durabilidad, incluyendo los del ACI, la norma europea ENV-206<sup>2</sup> y varios artículos de especialistas sobre el tema<sup>5,6,7,8,9</sup>, se deja muy en claro que el problema de durabilidad de las estructuras de concreto se debe considerar bajo los siguientes aspectos:

- La clasificación de la agresividad del medio ambiente
- La clasificación de la resistencia del concreto al deterioro
- Los modelos (preferentemente numéricos) del deterioro y envejecimiento de las estructuras de concreto
- La vida útil deseada, o sea, el periodo de tiempo en el cual se desea que la estructura atienda ciertos requisitos funcionales con un mínimo de mantenimiento.

La clasificación de la agresividad del ambiente, con base en las condiciones de exposición de la estructura o de sus partes, debe tener en cuenta el micro y el macro clima actuantes sobre la obra en sus partes críticas.

A partir de una síntesis de las publicaciones técnicas existentes sobre el tema, la agresividad ambiental puede ser evaluada según el punto de vista de la durabilidad de la armadura y de la durabilidad del propio concreto, para lo cual se ha establecido la clasificación que muestra la Tabla No. 1.

Clase de agresividad	Agresividad	Riesgo de deterioro de la estructura
I	Débil	Insignificante
II	Media	Pequeño
III	Fuerte	Grande
IV	Muy fuerte	Elevado

Tabla No. 1: Clasificación de la agresividad del ambiente

Una clasificación de la agresividad del ambiente según el punto de vista de la durabilidad de la amadura puede llevarse a cabo con los parámetros que aparecen en la **Tabla No.2**.

Clase de agresividad	Macroclima	Microclima	Gás carbónico CO <sub>2</sub> en el ambiente	Cloruros Cl <sup>-</sup> en el ambiente
I	Atmósfera rural	Humedad relativa ≤ 60% Interiores secos	≤ 0,3 %	≤ 200 mg / l
II	Atmósfera Urbana	Humedad relativa de 60 a 95% Humedad Relativa = 100 % Elementos sumergidos	≤ 0,3 %	< 500 mg / l
III	Atmósfera Marina o industrial	Humedad relativa de 65 a 98%	≥ 0,3%	> 500 mg / l
IV	Polos industriales	Zonas húmedas industriales	> 0,3 %	> 500 mg / l

**Tabla No.2:** Clasificación de la agresividad del ambiente relacionada con la durabilidad de las estructuras.

La clasificación de la agresividad ambiental según el punto de vista de la **durabilidad del concreto** de las estructuras, puede efectuarse de acuerdo con los parámetros que se incluyen en la Tabla No.3, distinguiéndose tres mecanismos básicos de deterioro:

- **Lixiviación** por acción de las aguas puras, carbónicas agresivas y ácidas que disuelven y lavan los compuestos de pasta hidratada, especialmente el hidróxido de calcio.
- **Expansión** por acción de sulfatos reactivos sobre el aluminato tricálcico de la pasta
- **Expansión** debida a las reacciones de los álcalis del cemento con ciertos agregados.

Clase de agresividad	pH	CO <sub>2</sub> agresivo mg/l	Amoníaco NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	Magnesio Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup> mg/l	Sulfato SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	Sólidos disueltos mg/l
I	> 6,0	< 20	<100	<150	<400	>150
II	5,0 – 5,9	20 – 30	100 – 150	150 – 250	400 – 700	150 – 50
III	5,0 – 4,5	30 – 100	150 – 250	250 – 500	700 -1500	< 50
IV	< 4,5	> 100	> 250	> 500	>1500	< 50

**Tabla No.3:** Clasificación del ambiente relacionada con la durabilidad del concreto

**Notas:**

1. En el caso de suelos el análisis debe efectuarse la fase acuosa del suelo.
2. Agua en movimiento con temperatura por encima de 30°C, o suelo agresivo muy permeable conducen al aumento de un grado en la clase de agresividad.
3. Ciertas combinaciones de acción física superficial, tales como abrasión y cavitación aumentan la velocidad de ataque químico y pueden conducir al aumento de un grado en la clase de agresividad.

Los **concretos** se clasifican de acuerdo con sus características y con aquellas propiedades de mayor interés en lo que se refiere a su resistencia a la agresividad del medio ambiente al cual estará sometido. Ante la carencia de factores comprobados, obtenidos de ensayos experimentales con los concretos que van a ser

efectivamente utilizados para construir la estructura, se puede adoptar valores de orientación, tomados de las referencias bibliográficas citadas, y los cuales se presentan en la **Tabla 4**, referente a la corrosión de las armaduras, y la **Tabla 5** que se refiere al deterioro del concreto.

Clase de concreto	Nivel de resistencia	Máxima Relac a/c	Deterioro por carbonatación	Deterioro por ataque de cloruros
			% de adición	% de adición
Durable	≥ 50 MPa	≤ 0,38	≤ 10% de puzolana, microsilica o escoria	≥ 20% de puzolana o microsilica ≥ 65% de escoria de alto horno
Resistente	35–45 MPa	0,38 a 0,50	≤ 10% de puzolana, microsilica o escoria ≤ 15% de escoria de alto horno	≥ 10% de puzolana o microsilica ≥ 35% de escoria de alto horno
Normal	25–30 MPa	0,50 a 0,62	Cualquiera	Cualquiera
Atacable	10–20 MPa	Mayor a 0,62	Cualquiera	Cualquiera

**Tabla No.4:** Clasificación de los concretos frente al riesgo de corrosión de las armaduras

Clase de concreto	Nivel de resistencia	Deterioro por Expansión		Deterioro por lixiviación
		Contenido de C <sub>3</sub> A en el cemento anhidro	Porcentaje de adición	Porcentaje de adición
Durable	≥ 50 MPa	≤ 5%	≥ 20% de puzolana o microsilica ≥ 65% de escoria de alto horno	≥ 20% de puzolana o microsilica ≥ 65% de escoria de alto horno
Resistente	35–45 MPa	≤ 5%	≥ 10% de puzolana o microsilica ≥ 35% de escoria de alto horno	≥ 10% de puzolana o microsilica ≥ 35% de escoria de alto horno
Normal	25–30 MPa	≤ 8 %	Cualquiera	Cualquiera
Atacable	10–20 MPa	Cualquiera	Cualquiera	Cualquiera

**Tabla No.5:** Clasificación de los concretos frente al riesgo de deterioro por lixiviación o por la formación de compuestos expansivos.

Los **modelos numéricos de deterioro o envejecimiento de las estructuras**, también deben ser considerados por separado, bien estén relacionados con la corrosión de las armaduras o con el deterioro del concreto.

Para la corrosión del refuerzo existen actualmente modelos de envejecimiento, mientras que para el deterioro del concreto (velocidad de deterioro por sulfatos, por lixiviación, por

reacción álcali-agregado y otras formas de deterioro) aún no existen modelos matemáticos satisfactorios, por lo que hay que basar las condiciones de durabilidad en valoraciones cualitativas.

La **Tabla No.6** muestra algunas de las formulaciones más empleadas en el caso de las armaduras.

Riesgo preponderante	Recubrimiento mínimo de concreto	Donde:
Carbonatación	$e_{CO_2} = k CO_2 \cdot T^{1/2}$	$e_{CO_2}$ = espesor de concreto en cm $kCO_2$ = coeficiente de carbonatación T = vida útil en años
Penetración de Cloruros	$e_{cl} = 2 \cdot (z) \cdot (D_{ef} Cl \cdot T)^{1/2}$	$e_{cl}$ = espesor del concreto en cm (z) = Valor de la función de error de Gauss, obtenida según la Tabla No.7 $D_{ef} Cl$ = Coeficiente efectivo de difusión, o de difusividad del concreto en cuestión, en $cm^2/año$ T = vida útil en años Penetración de cloruros
	$erf(z) = 1 - ((C_{ecl} - Co) / (C_s - C_o))$  $erf(z) = (C_s - 0,30) / (C_s - 0,02)$	$C_{ecl}$ = concentración de cloruros a la profundidad $e_{cl}$ en el tiempo T $Co$ = concentración inicial de cloruros en el interior del concreto del elemento estructural $C_s$ = concentración de cloruros en la superficie del elemento estructural, admitida como constante* (ver nota) Erf (z) = función de error de Gauss (Ver Tabla No.7).

**Nota:** A continuación se listan algunos valores de  $C_s$  de acuerdo al tipo de uso de estructuras de concreto reforzado:

- Concreto de tanques industriales con salmuera  
 $C_s = 7\%$
- Concreto sometido a salpique de agua de mar  
 $C_s = 1,2\%$

- Concreto en atmósfera marina (niebla salina) o atmósfera industrial  
 $C_s = 0,33\%$
- Concreto en atmósfera rural o urbana no marina  
 $C_s = 0,03\%$

En todos los casos la concentración de cloruros se refiere al contenido en peso de cloruros, en el concreto, como % de la cuantía de cemento del concreto.

z	erf(z)	z	erf(z)	z	erf(z)
0,00	0,0000	0,40	0,4284	1,20	0,9103
0,01	0,0113	0,45	0,4755	1,30	0,9340
0,05	0,0564	0,50	0,5205	1,40	0,9523
0,10	0,1125	0,60	0,6039	1,50	0,9661
0,15	0,1680	0,70	0,6778	1,60	0,9763
0,20	0,2227	0,80	0,7421	1,70	0,9838
0,25	0,2763	0,90	0,7969	1,80	0,9891
0,30	0,3286	1,00	0,8427	1,90	0,9928
0,35	0,3794	1,10	0,8802	2,00	0,9953

La correspondencia básica entre agresividad del medio ambiente y durabilidad del concreto es considerada en la **Tabla No.8**. Finalmente la vida útil deseada, es decir el tiempo que se desea que la estructura atienda ciertos requisitos funcionales, con un mínimo mantenimiento, se podrá valorar de acuerdo con lo que se expondrá a continuación.

Clase de agresividad	Concreto recomendable
I (Débil)	Cualquier tipo
II (Media)	Normal, resistente y durable
III (Fuerte)	Resistente y durable
IV (Muy fuerte)	Durable

**Tabla No. 8:** Correspondencia entre agresividad del ambiente y durabilidad del concreto.

## Vida Útil de las Estructuras

Por vida útil se entiende el período de tiempo durante el cual una estructura será capaz de desempeñar las funciones para las cuales fue proyectada. En el caso de deterioro de la estructura por corrosión de la armadura, se puede distinguir por lo menos tres situaciones:

a) Un período de tiempo que va hasta la despasivación de la armadura, el cual se denomina, normalmente, **período de iniciación**. A este período de tiempo se puede asociar la llamada **vida útil de proyecto**. Normalmente corresponde al período necesario para que el frente de carbonatación o el frente de cloruros alcance la armadura.

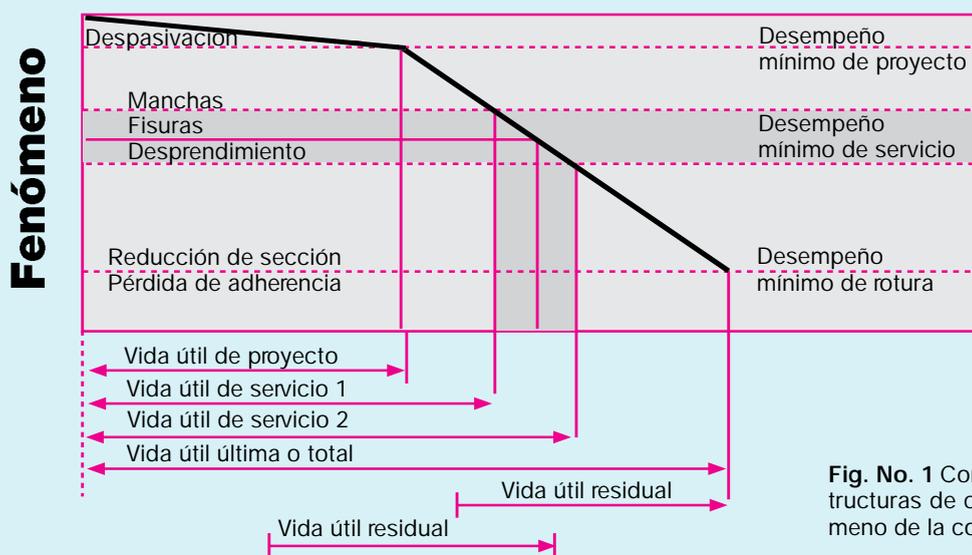
Por *frente de carbonatación* se entiende la posición de la interfase entre una región carbonatada, de baja alcalinidad por acción del gas carbónico sobre los productos alcalinos de la hidratación del cemento y una región contigua no carbonatada y por consiguiente de alto pH.

Por *frente de cloruros* se entiende la posición de la interfase entre una región contaminada por un cierto nivel de cloruros, suficiente para despasivar la armadura en aquella condición específica y una región contigua donde el nivel de cloruros todavía no alcanza el nivel suficiente para despasivar. Este contenido de cloruros varía en función de varios condicionantes entre el 0,05 y el 1% del peso del cemento. El hecho de que el frente de carbonatación o un cierto nivel

de cloruros haya alcanzado la armadura y teóricamente la haya despasivado, no significa necesariamente que a partir de ese momento habrá corrosión importante. Ese período de tiempo, no obstante, es un período que debe ser tenido en cuenta al proyectar la estructura, en aras de la seguridad.

b) Un período de tiempo que va desde el momento en que aparecen manchas en la superficie del concreto, u ocurren fisuras en el concreto de recubrimiento, hasta cuando se presenta el desprendimiento del recubrimiento. A este período se asocia la **vida útil de servicio o de utilización** de la estructura. Este período es muy variable y depende de cada caso en especial, pues ocurre que, en ciertas construcciones, es inadmisibles que la estructura presente manchas de corrosión o fisuras. En otros casos sólo la caída de pedazos de concreto, que ponga en peligro la integridad de las personas, puede ser considerado el momento a partir del cual se debe considerar cumplida la vida útil de servicio de la estructura.

c) Un período de tiempo que va hasta la ruptura o colapso parcial o total de la estructura. A este período de tiempo se asocia la llamada **vida útil última o total**. Corresponde al período de tiempo para el cual habrá una reducción significativa de secciones resistentes de la armadura o una pérdida importante de adherencia concreto-refuerzo, acarrearando el colapso parcial o total de la estructura.<sup>10</sup>



**Fig. No. 1** Concepto de vida útil de las estructuras de concreto en función del fenómeno de la corrosión del refuerzo.

### Consideraciones finales

La **Figura No. 1**<sup>11</sup> presenta los conceptos de vida útil anteriormente expuestos, tomando como base las dos fases principales del proceso de deterioro del concreto reforzado (iniciación y propagación) desde el punto de vista de la corrosión de las armaduras.

En este modelo fue introducido el concepto de **vida útil residual**, que corresponde al período de tiempo que la estructura todavía podrá desempeñar sus funciones, contado en este caso a partir de la fecha de una evaluación. Esta evaluación y el correspondiente diagnóstico puede ser efectuado en cualquier instante de la vida en uso de una estructura. El plazo final, en este caso, puede ser tanto el límite de las condiciones de servicio, como el límite de rotura, dando origen a dos "**vidas útiles residuales**"; una más corta contada hasta la aparición de manchas de corrosión, fisuras o desprendimientos del concreto y otra, más larga, contada hasta la pérdida significativa de la capacidad resistente del componente estructural o su eventual colapso.

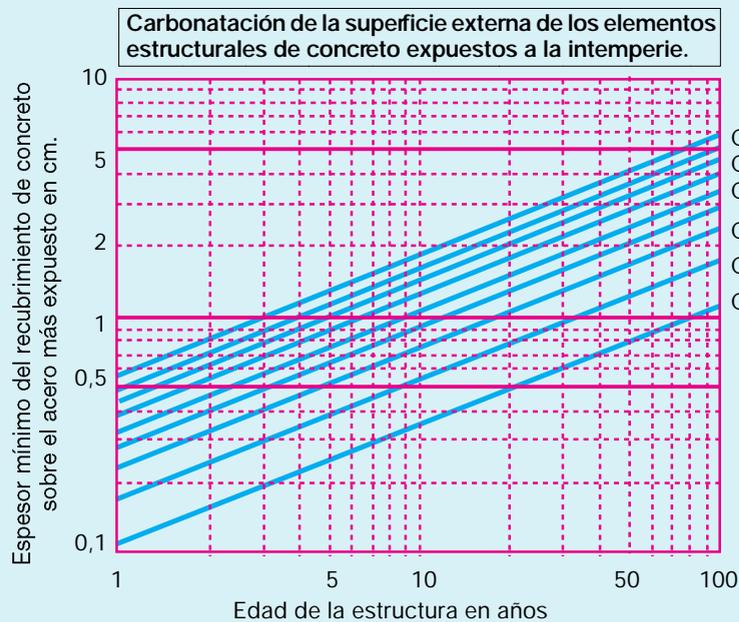
Desde el punto de vista del **concreto**, los sulfatos presentes en el agua de mar pueden acarrear reacciones deletéreas

de expansión con formación de compuestos expansivos del tipo etringita y yeso secundario o reacciones tipo álcali-agregado, las cuales conducen al agrietamiento del concreto en las estructuras.

El contenido de sulfato en un concreto depende de la cantidad de cemento y del contenido de yeso primario en el citado cemento. Así, por ejemplo, un concreto con una densidad de 2.300 kg/m<sup>3</sup>, amasado con 350 kg/m<sup>3</sup> de un cemento cuyo contenido de yeso es máximo del 3%, conducirá a un contenido total máximo de sulfatos del orden de 0,46% del peso del concreto. Si las cantidades de yeso encontradas fueren superiores significarán contaminación. El exceso lo ocasionarán sulfatos que han penetrado el concreto endurecido, normalmente provenientes del agua de mar.

En general el valor de referencia para la **vida útil de proyecto**, para obras corrientes, puede ser de 50 años. Ciertas obras de mayor importancia social y estructural pueden ser previstas para una vida útil de 100 años o quizá más.

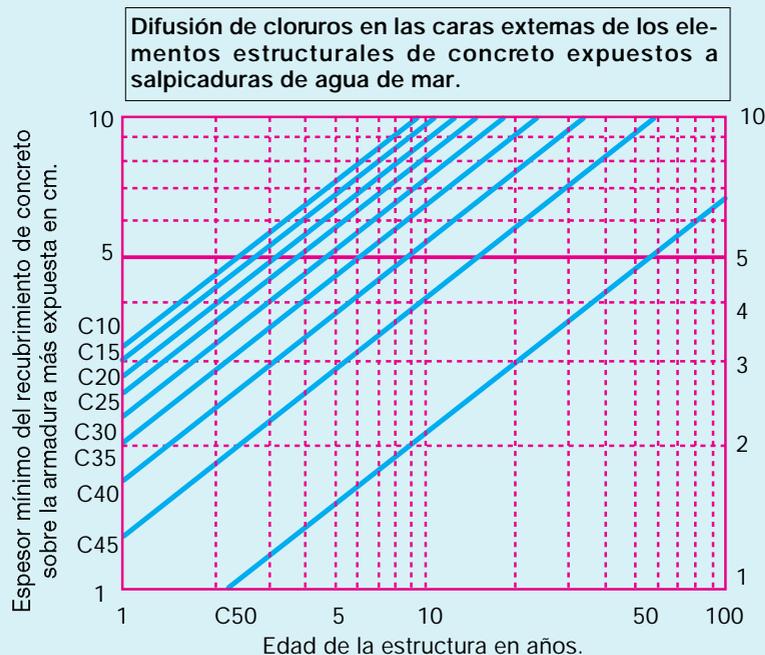
Una aplicación práctica de estos conceptos la pueden constituir las Gráficas 2 y 3, desarrolladas dependiendo del espesor del recubrimiento en función del ambiente que rodea la estructura, la calidad del concreto y la vida útil deseada.



**Figura 2.** Abaco para la determinación del espesor de recubrimiento sobre las armaduras en función del ambiente (zona urbana e industrial), del concreto (Resistencias entre 10 y 50 MPa) y de la vida útil deseada (1 a 100 años).

Modificación del Recubrimiento si se Usa	
Ceniza volante	+ 20%
Puzolana	+ 10%

En caso de que se use cemento adicionado con ceniza volante o con puzolanas, el espesor de recubrimiento se debe aumentar en un 20% y en un 10% respectivamente.



**Figura 3.** Abaco para la determinación del espesor de recubrimiento sobre las armaduras en función del ambiente (zona de salpicadura de agua de mar), del concreto (Resistencias entre 10 y 50 MPa) y de la vida útil deseada (1 a 100 años).

Modificación del Recubrimiento si se Usa	
Microsilica	- 20%
Cemento $C_3A \geq 12\%$	-20%

En caso de que se use microsilica o cemento con contenido de  $C_3A \geq 12\%$ , el espesor de recubrimiento se puede disminuir el 20%.

## Referencias

<sup>1</sup> AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Corrosion of metals in concrete.** ACI Committee 222.

<sup>2</sup> EUROPEAN NORMALIZATION VOLUNTAIRE. **ENV-206 Performance, production, Mise en Ouvre et Critères de conformité du Béton.** 1992

<sup>5</sup> ROSTAM, Steen. **Service life design.** The european Approach. Concrete International. Vol.15, n.7, July 1993. Pp. 24-32.

<sup>6</sup> ANDRADE, C.; GONZALEZ, J.A. **Tendencias actuales en la investigación sobre corrosión de armaduras.** Informes de la Construcción, v. 40, n.398, pp. 7-14, nov.dic. 1988.

<sup>7</sup> ANDRADE, C. **Manual para el diagnóstico de estructuras con armaduras corroidas.**

<sup>8</sup> HELENE, Paulo R. L. **La agresividad del medio y la durabilidad del homigón.** Homigón, AATH, n.10, p.25-35, mayo/agosto.,1983.

<sup>9</sup> -. **Vida util de las estructuras de concreto armado sob o ponto de vista da corosao da armadura.** In: seminario de

dosagem e controle dos concretos estruturais, varias ciudades, julio a set.93. Anais ENCOL/SENAI, Brasilia,1993.

<sup>10</sup> AL-SULAIMANI, G. J.; KALEEMULLAH, M.; BASUNBUL, I. A.;RASHEEDUZAFAR. **Influence of corrosion and cracking on Bond behavior and strength of reinforced concrete members.** ACI Structural Journal, p. 220-31, March-April, 1992.

<sup>11</sup> HELENE, P.R.L **Diagnóstico de la corrosión de la armadura y vida útil residual de estructuras de concreto.** Seminario FOSROC/RENA sobre patología de las estructuras de concreto. Una Visión Moderna, Salvador, diciembre 1992.

### Autor:

Dr. Paulo Roberto do Lago Helene (Profesor de la Universidad de Sao Paulo, Brasil)

Traducido del portugués por el Ing. Carlos A. Arcila López, miembro de la Junta Directiva de la Seccional Colombiana del ACI