

# PERFILES DE PENETRACIÓN DE CLORURO EN ESTADO IÓNICO EN CONCRETOS DEL RANGO A/C 045 A 0,65

Jesús Angel Chávez Machado\*, Hildebrando Buendía Ríos\*\*

## RESUMEN

El trabajo realizado tiene como objetivo continuar las investigaciones sobre el efecto que tienen los iones cloruro sobre las variables que determinan el comportamiento del concreto como cubierta protectora del acero de refuerzo, cuando está sometido a las condiciones ambientales del litoral marino de la costa peruana. Considerando la relevancia que tiene la relación agua/cemento en la obtención de las propiedades de compacidad del concreto y por tanto en la facilidad con que los cloruros pueden difundirse en este medio, se procedió a preparar con agua del subsuelo, agregados de la región y cemento Portland Tipo I, cuarenta y cinco probetas cilíndricas de 75 x 150 mm, las que luego de ser sometidas a 1, 3 y 7 días de curado se impermeabilizaron con parafina por todos los lados menos en un plano basal y luego se sumergieron en agua tridestilada con cloruro de sodio de alto grado de pureza, en proporciones similares a las condiciones de salinidad del Océano Pacífico en el litoral peruano. Después de 30 días se retiraron las probetas, luego se procedió a extraer muestras de polvo en el eje vertical cada 0,02 m de profundidad, mediante métodos mecánicos, obteniéndose 315 muestras que fueron analizadas mediante un analizador digital de ion selectivo. Los ensayos de ion selectivo para cloruros, luego de la inmersión de las probetas de concreto en agua de mar artificial durante 30 días, revelaron que la concentración de cloruros/peso de muestra varía con la profundidad de penetración de acuerdo a los perfiles de concentración encontrados, siguiendo la tendencia típica de la difusión de cloruros en concreto. A mayor relación agua/cemento, los valores de la concentración de cloruros para una profundidad de penetración dada son generalmente mayores. Los valores de las concentraciones superficiales de cloruros aumentan a medida que la relación agua/cemento se incrementa.

**Palabras clave:** Tiempo de curado, compacidad, coeficiente de difusión aparente, diseño de mezcla.

## ABSTRACT

The objective of the work done is to initiate the investigations about the effects the chloride ions have over the variables that determine the behavior of the concrete as the iron protecting coat and reinforcement when it is subject to the marine environment on the North Coast of Peru. Considering the relevance that the water/cement relationship has and the curing time in the compact and therefore in the facility in which the chlorides can spread in this environment, it was proceeded to prepare with underground water, attachés of the region ) and Portland Cement Type I, forty-five 75 x 150 mm cylindrical test tubes, which, after being subjected to 1, 3 and 7 days of cure, were waterproofed with paraffin all over in a basal plan and then they were immersed in sea water simulating the conditions of salinity of the Pacific Ocean on the Peruvian Coast. After days of taking away the test tubes it was proceeded to extract powder samples in the vertical axis each of 0,02 m depth, by means of mechanical methods, obtaining 315 samples that were analyzed by means of a selective ion digital analyzer, reaching the following most outstanding conclusion. The test of immersion of the concrete test tubes in artificial sea water for 30 days revealed that the concentration of chlorides/weight sample varies with the penetration depth (concentration profiles) following the typical tendency of the diffusion of chlorides in concrete. To a higher water/cement relationship, the chloride concentration values for a given penetration depth are generally bigger. The values of the superficial concentrations of chloride increase as the relationship water/cement and the time of cured are increased. It is recommended to continue with the second phase which consists in calculating the apparent diffusion coefficient, considering the concrete capacity and capillary to understand the mechanism.

**Key Words:** curing time, compact (concrete), apparent diffusion coefficient, mixture design.

\* Docente de la Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Federico Villarreal.

\*\* Docente de la Facultad de Ciencias Sociales. EAP. Geografía, Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

## I. INTRODUCCIÓN

El concreto reforzado es el material más empleado en la actualidad a nivel mundial tanto en construcciones civiles como viales, en virtud de sus características que lo hacen ventajoso con relación a cualquier otro material para el mismo uso. Entre estas ventajas se puede destacar su alta resistencia a la compresión, facilidad en la preparación y el transporte, buena trabajabilidad, bajo costo y elevada durabilidad.

Estas propiedades excepcionales del concreto se ven alteradas por una serie de agentes agresivos del medio, que generalmente causan el deterioro progresivo de las estructuras construidas con este material. El concreto se caracteriza por tener de 10 a 30% de porosidad, ésta depende principalmente de la relación del cemento con el agua con que reacciona para producir el gel que une los agregados y de las condiciones de curado. Esta porosidad es la vía que utilizan los agentes agresivos para iniciar la degradación de las estructuras de concreto reforzado.

El concreto normalmente se utiliza como recubrimiento de las estructuras de acero al cual protege de la corrosión, ya que permite la formación de una barrera física que aísla la zona de contacto entre el acero y el medio. Esta capa pasiva es muy estable y consta de varios estratos de óxido de hierro y cemento hidratado que se forman sobre el acero cuando éste entra en contacto con la parte alcalina del cemento, convirtiéndose el concreto en un medio ideal para proteger el acero. La eficacia del concreto, ante medios agresivos, depende fundamentalmente del espesor del recubrimiento y del diseño de la mezcla, dado que menores relaciones, agua/cemento y altos contenidos de cemento garantizan un concreto impermeable y de elevada resistencia mecánica (Wietek 1996). Concretamente el acero de la estructura se cubre de una capa de gel de cemento y agua que impide que los agentes externos actúen para que se produzca ésta en el acero, la capa de pasivación debe ser rota para que se inicie la corrosión del acero.

Cuando el acero pasa de un estado pasivo a un estado activo, el cambio va acompañado por un marcado incremento del proceso de corrosión. Esto se presenta en condiciones de laboratorio, que generalmente son ideales. En la realidad el incremento no es tan marcado. Los mecanismos que dirigen a estos cambios son básicamente dos: la neutralización del ambiente adyacente al acero o proceso de carbonatación y la penetración y rotu-

ra localizada de la capa pasiva alrededor del acero por sustancias corrosivas tales como los cloruros (Ramírez Cruz, 1997; Wietek, 1996).

La corrosión ocasionada por cloruros se inicia cuando la concentración es tan alta que la alcalinidad del concreto no es lo suficientemente grande para proteger el acero. El nivel de cloro que se requiere para que se inicie la corrosión, es el llamado valor umbral de cloruros. Una vez que este valor se ha alcanzado se puede decir que la fase de protección ha terminado y la fase de corrosión se inicia. B. Wietek y E.G. Kunzl (1997)<sup>6</sup> indican que el concreto tiene un valor inicial de pH 12 ya que está permanentemente protegido contra la corrosión. El medio ambiente alcalino del concreto crea una capa de pasivación sobre la superficie del concreto protegiéndolo de reacciones químicas adicionales. Solamente en el caso de influencias externas, esta capa protectora es distorsionada y la corrosión del acero puede ocurrir.

La fase inicial está influenciada por una serie de factores, aún cuando la velocidad de penetración de cloruros depende de la densidad del concreto, de la capacidad de mezcla de los cloruros, de la concentración en la superficie y del mecanismo de transporte. Este parámetro es descrito por el coeficiente de difusión que evalúa la medida de la distribución del cloro en el concreto. La capacidad de mezcla del cloro depende a la larga del tipo de concreto usado, de la relación agua/cemento y de los aditivos que se agregan al concreto (Wietek, 1996; Garboczi, E.J., Seliwartz, L.M. y Bentz, D., 1995).

La densidad del concreto está controlada por la relación del agua/cemento y la presencia de aditivos como silicatos, cenizas, etc. Estos aditivos muchas veces reducen la penetración de cloruros porque hacen a la estructura más densa, asumiendo que el concreto está libre de hendiduras. Una relación agua/cemento baja produce también una reducción de la penetración de cloruros porque a medida que la relación agua/cemento disminuye el concreto se hace más denso.

En las últimas décadas, se han llevado a cabo un gran número de trabajos de investigación sobre el concreto, particularmente en lo que concierne a su resistencia a la corrosión y desgaste por acción del medio ambiente corrosivo<sup>5, 6, 8, 9, 12, 14</sup>. Igualmente, se han ideado procedimientos para evaluar el comportamiento del concreto bajo condiciones de servicio y en laboratorios Swedish Cement and Concrete Research Institute (L. Maldonado, 1996; otros.)

Hipotéticamente se planteó que el comportamiento del concreto, actuaba cumpliendo básicamente lo propuesto por la Segunda Ley de Fick, y a medida que la relación agua/cemento era menor la difusión de los cloruros también se hacía menor y el tiempo de curado modificaba ligeramente esta tendencia. Sobre difusividad y/o influencia de la relación agua/cemento y del tiempo de curado se han realizado varios trabajos de investigación (Castro, L. Maldonado y R. de Coss, 1993; L. Maldonado, P. Castro, J. Marrufo, Gonzáles y A. Zapata, 1999; Dhir, R.K. y otros, 1996)<sup>14</sup>.

E.J. Garbozzi y D.P. Bentz (1998) investigaron la relación entre la difusión de cloruros y la permeabilidad en pastas de cementos y morteros a diferentes relaciones y volúmenes de arena; calcularon los coeficientes de difusión experimentalmente, comparándolos mediante simulación por computadora, basada en la segunda ley de Fick, y concluyeron que los coeficientes de difusión en periodos relativamente cortos varían del 4 al 7% entre los valores experimentales y los valores de simulación. Agregan que la difusión y la permeabilidad son funciones directas del grado de hidratación. Para el mismo grado de hidratación, al introducirse partículas de arena en la pasta de cemento, da como resultado coeficientes de difusión más altos. Finalmente sostienen que existe una relación lineal entre el coeficiente de difusión y el radio crítico del poro.

D.P. Bentz, R.J. Detwiler, E.J. Garbozzi, P. Halamickova y L.M. Schwartz (1998) luego de analizar los modelos de la microestructura de morteros y concretos, concluyeron que el cálculo de los coeficientes de difusión de los iones cloruro en el concreto puede ser estimado en su estado general; no explican el estado de empaquetamientos de cloruros ni las reacciones que tienen origen en la presencia de aluminatos que se presentan en la pasta de cemento; y no explican el comportamiento real de la difusión debido a la naturaleza heterogénea del concreto, por el contrario consideran otros parámetros además de la relación agua/cemento, volumen de mezcla de los agregados, partícula clasificada según tamaños de distribución del cemento y los agregados, grado de hidratación del cemento en pasta al tiempo de interés de la investigación, la cantidad de hidróxido de calcio producto del curado y de las reacciones del cemento, el espesor de las regiones de la zona de transferencia interfacial de las interfaces presentes en el concreto, y el diámetro medio de la partícula de cemento.

Estudios realizados en el Swedish Cement and Concrete Research Institute, por Karim Petterson y colaboradores en 1998, establecen que la obtención de homogeneidad del concreto depende de la forma cómo se han elaborado las probetas durante el moldeo, y que la densidad tiene un efecto importante en la iniciación de la corrosión, sus investigaciones muestran que a bajas relaciones agua/cemento, el rango de corrosión baja, probablemente porque el concreto es más denso. Más específicamente, establecen que la relación agua/cemento afecta principalmente a la estructura del concreto, a relaciones más bajas la estructura es más densa lo que influye en las fases de iniciación y propagación de la corrosión del acero de refuerzo.

Polseen (1993) y Sanberg (1995) demostraron que la difusión de cloruros disminuye cuando decrece la relación agua/cemento, explican que el umbral de cloruros varía directamente con esta relación. Las velocidades de corrosión se hacen más lentas si la relación se hace menor, sobre todo menor que 0,40, basándose en que la cubierta más densa impide el flujo entre las superficies de ánodo y cátodo.

Karim Pettersen (1996) indica que el valor umbral no varía con el espesor de la cubierta, posiblemente porque la diferencia de densidad es pequeña para tener efectos significativos.

Finalmente, el objetivo primordial, que se ha logrado con este trabajo de investigación, es el de iniciar la evaluación de las variables que determinan la difusión de cloruros a través del concreto elaborado con los cementos y agregados más comúnmente usados en la obra civil del norte del Perú.

## II. MATERIALES

Para la ejecución de la etapa experimental se prepararon 45 probetas de concreto de 7,5 cm de diámetro por 15 cm de altura, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM C31. Las relaciones agua/cemento utilizadas fueron de 0,45, 0,50, 0,55, 0,60 y 0,65. La mezcla de cemento, agua, agregados grueso y fino, con la que se elaboraron las probetas se preparó con los siguientes materiales:

- Cemento Portland Tipo I, norma ASTM C150 fabricado por Cementos Pacasmayo S.A.
- Los agregados para la elaboración de las probetas, se hicieron siguiendo los procedimien-

tos indicados en las normas nacionales ITINTEC, las curvas de ajuste se muestran a continuaci3n.

Para el dise1o de mezcla se sigui3 el M3todo del Comit3 211 de la ACI. El siguiente cuadro expresa la secuencia de c3lculos y el resultado de los mismos.

### III. M3TOD0

Verificado y corregido experimentalmente el dise1o de mezcla, se procedi3 al moldeo de las probetas, adaptando las normas ASTM 192 e ITINTEC 339.033 a las caracter3sticas dimensionales de nuestras probetas, se pesaron cuidadosamente cada uno de los componentes del concreto en balanzas de laboratorio con aproximaci3n de 0,5 g. Llenados los moldes se almacenaron seg3n el procedimiento indicado en la norma ASTM C33, en un ambiente de 16 a 27°C de temperatura para todos los tiempos de curado. Se puso especial cuidado en que las probetas estuvieran protegidas de los rayos directos del sol o del calor proveniente de otro dispositivo. Luego de 24 + 8 horas se desmoldaron las probetas removi3ndolas cuidadosamente y verificando las condiciones de porosidad externas.

Posteriormente se prepar3, en tinas de PVC de 40 litros de capacidad, una soluci3n saturada de cal en las que se ubicaron las probetas en un mismo nivel manteniendo una separaci3n entre probetas de 3 cm; luego, se cubrieron 3stas con la soluci3n hasta 10 cm por arriba. Despu3s de 24 horas se procedi3 a retirar las muestras programadas para un tiempo de curado de un d3a y as3 sucesivamente para 3 y 7 d3as, ubic3ndolas en un ambiente a temperatura de  $23 \pm 1,72^\circ\text{C}$ , estableci3ndose un control de temperatura permanente acondicionado con un sistema de ventilaci3n. Para el curado se sigui3 la norma ASTM C31. En ning3n caso las muestras han sido expuestas al agua en movimiento.

Cumplidos los 30 d3as de almacenamiento, seg3n las especificaciones de la norma ASTM C511, se procedi3 a dejar libre el plano basal de la parte superior, y todo el resto de las probetas cil3ndricas se cubrieron con una capa de hasta 3mm de parafina impermeable, la que se a1adi3 mediante un procedimiento de fusi3n a baja temperatura.

A continuaci3n, se tomaron muestras de polvo de concreto para determinar, la concentraci3n promedio de cloruros de las probetas de prueba, con la finalidad de analizar el contenido inicial de

cloruros combinados en el concreto, y determinar de la concentraci3n  $C_0$  antes de iniciar la prueba de inmersi3n.

En tinas de PVC, lavadas previamente con hipoclorito de sodio al 5% y enjuagadas con agua tres veces destiladas hasta desaparecer todo vestigio de grasas o impurezas, se coloc3 una soluci3n de cloruro de sodio grado reactivo de 35.5 gr/l que corresponde a la media que contiene el agua de mar de la zona (La Libertad). Para la preparaci3n de esta soluci3n se utiliz3 agua tres veces destilada libre de iones. Llenadas las tinas con esta soluci3n se sumergieron todas las probetas, cubri3ndolas hasta 12.5 cm de su altura, estableciendo la misma longitud sumergida para todas las probetas, estado en el cual permanecieron 30 d3as. Luego, del tiempo de permanencia se retiraron las probetas, las mismas que, inmediatamente despu3s, fueron aisladas mediante una cubierta de pl3stico a fin de evitar cualquier tipo de contaminaci3n del medio ambiente, dicha cubierta fue retirada parcialmente cuando se requiri3 tomar las muestras para los ensayos qu3micos programados, volvi3ndose a cubrir inmediatamente despu3s.

Extra3das las probetas de la soluci3n en las que fueron sumergidas, se procedi3 a programar la toma de muestras de polvo de concreto para lo cual se utiliz3 una taladradora de columna preparada para extraer sucesivamente muestras de cada uno de los ocho planos en los que se dividieron las probetas entre la distancia de 0 a 14 cm. Las muestras se tomaron a una profundidad de 2 cm por cada plano. Antes de llegar a cada plano se extrajo cuidadosamente el material hasta 2.5 mm arriba del plano correspondiente y se estableci3 como espesor del plano 2.5 mm arriba y 2.5 abajo del di3metro central del plano correspondiente estableci3ndose como espesor del mismo 5 mm a fin de obtener la suficiente cantidad de muestra para los an3lisis qu3micos. Se hicieron tres ejes de perforaci3n a cada probeta a fin de tomar muestras de tres puntos equidistantes para cada plano, con lo cual se lograba minimizar las distorsiones que pudiesen provocar la presencia de agregados gruesos en alguno de los puntos del plano. Inicialmente se us3 una broca especial para concreto de 10mm de di3metro para retirar el material previo al plano, luego se utiliz3 una broca inoxidable de alta calidad especial para concreto, de  $\frac{1}{2}$  di3metro, para la toma de muestras en el plano, obteni3ndose un muestreo escalonado sin contaminaci3n entre plano y plano. Mediante este procedimiento se tomaron 120 muestras por tres repeticiones, lo que hizo un total de 360 muestras

distribuidas en 315 muestras de polvo de concreto después del experimento y 45 antes del experimento.

Obtenidas las muestras de polvo de concreto, se procedió a realizar los análisis de laboratorio para determinar la concentración de cloruros libres por peso de muestra, siguiendo el procedimiento indicado en la norma ASTM D512. La razón de usar esta norma es que solamente interesaba determinar los cloruros libres que intervienen en el proceso de difusión y no existía interés en determinar cloruros combinados porque éstos no intervienen en el proceso, y además porque no se contaba con el equipo necesario para realizarlo.

De la norma ASTM D512 se tomó el método de prueba C, para dicho efecto se usó el equipo de electrodo de ion selectivo, que permite medir directamente la concentración de cloruros. Antes de esta medición se procedió a calibrar el equipo con soluciones debidamente verificadas en contenido de cloruros, estableciendo patrones de concentración a una misma temperatura.

Con los datos obtenidos siguiendo el procedimiento anterior, se obtuvo el promedio a fin de determinar las concentraciones  $C_x$  para las siete

distancias de penetración que variaban cada  $0.02 \times 10^{-2}$  m.

Se trazaron curvas relacionando porcentajes en peso de cloruros por peso de muestra vs. distancia de penetración en metros con lo cual se hallaron los perfiles de concentración.

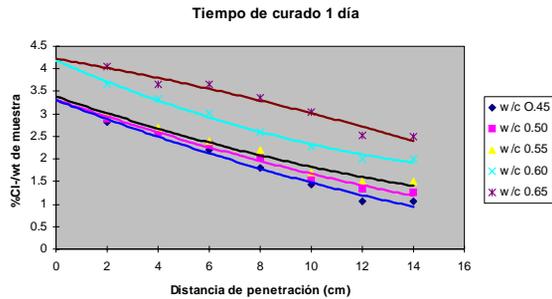
#### IV. RESULTADOS

En la primera fase del experimento se encontraron los valores de la concentración de cloruros por peso de muestra en condición de curado por 1, 3 y 7 días; los resultados se muestran en la Tabla N.º 1. Estos valores representan la concentración inicial  $C_0$  antes de la prueba de inmersión.

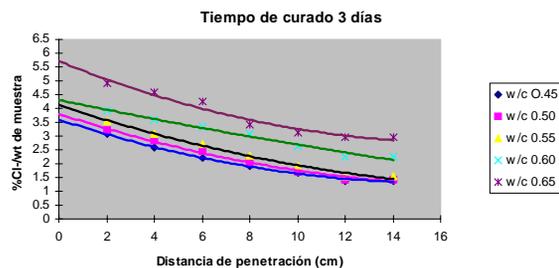
Los resultados gráficos de las mediciones de las concentraciones de cloruros en las probetas de concreto sumergidas durante 30 días en una solución de agua tridestilada con 35.5 g/l de NaCl (agua de mar artificial) en función de la profundidad de penetración para cada relación agua /cemento, se muestran en las figuras N.º 1, 2 y 3.

**Tabla N.º 1.** Concentración de cloruros por peso de cemento después del curado para diferentes relaciones agua/cemento

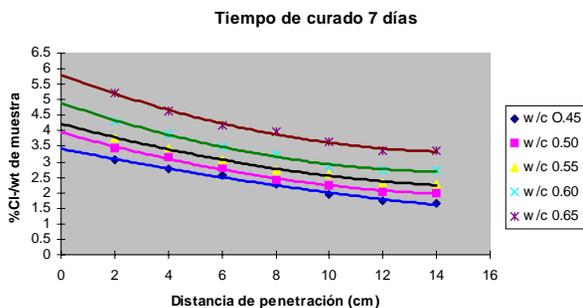
Relación agua/cemento w/c	tiempo de curado (días)	Concentración de cloruros (% Cl/ peso de cemento)			Promedio (% Cl/ peso de muestra)
		Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	
0,45	1	0,0255	0,0158	0,0269	0,02273
	3	0,0155	0,0260	0,0206	0,0207
	7	0,0188	0,0172	0,0263	0,02076
0,50	1	0,0250	0,0233	0,0172	0,02183
	3	0,0190	0,0256	0,0135	0,01936
	7	0,0159	0,0287	0,0185	0,02103
0,55	1	0,0210	0,0193	0,0236	0,0213
	3	0,0156	0,0174	0,0164	0,01646
	7	0,0189	0,0259	0,0193	0,02136
0,60	1	0,0193	0,0135	0,0220	0,01826
	3	0,0174	0,0214	0,0143	0,0177
	7	0,0179	0,0165	0,0169	0,0171
0,65	1	0,0161	0,0206	0,0211	0,0193
	3	0,0148	0,0279	0,0191	0,0206
	7	0,0255	0,0284	0,0250	0,0263



**Figura N.º 1.** Perfiles de concentración de cloruros para todas las relaciones a/c consideradas, después de un día de curado.



**Figura N.º 2.** Perfiles de concentración de cloruros para todas las relaciones a/c consideradas, después de tres días de curado.



**Figura N.º 3.** Perfiles de concentración de cloruros para todas las relaciones a/c consideradas, después de siete días de curado.

Las curvas representan los perfiles de concentración de cloruros, % de Cl/peso de muestra, para los diferentes tiempos de curado de 1, 3 y 7 días respectivamente. La tendencia de las curvas define que los cloruros han penetrado del exterior; a partir de los datos con los que se han trazado se puede calcular el coeficiente de difusión aparente<sup>8</sup>.

Las gráficas muestran, además, que para las diferentes relaciones agua/cemento la concentra-

ción de cloruros aumenta a medida que la distancia disminuye, debido principalmente a que la densidad del concreto depende de la cantidad de cemento agregada haciéndose mayor a medida que la cantidad de cemento disminuye en la mezcla<sup>4,5</sup>. La concentración de cloruros aumenta a medida de que el tiempo de curado es mayor, particularmente en las zonas más cercanas a la superficie por lo que es posible predecir la conducta de la difusión de los iones cloruro si se cumplieran las condiciones de la segunda ley de Fick en las probetas. A partir de estas curvas, se calcula por interpolación gráfica los valores de la concentración superficial, los mismos que se muestran en la Tabla N.º 2.

Los valores de concentración obtenidos tienen similitud con los valores que reportan L. Maldonado, P. Castro *et al.*<sup>12</sup>.

Estas gráficas muestran que la difusión de cloruros en concreto depende significativamente de la relación agua/cemento y del tiempo de curado, el cual tiene influencia en la permeabilidad de la superficie de la probeta o de las zonas cercanas a él. A partir de las gráficas, se obtuvieron los valores de la concentración superficial por interpolación, los mismos que se muestran en la Tabla N.º 2.

**Tabla N.º 2.** Valores de la concentración superficial obtenidos por interpolación gráfica.

Relación agua/ cemento					
Tiempo de curado	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
1 día	3.31	3.32	3.39	4.19	4.22
3 días	3.59	3.80	4.11	4.30	5.70
7 días	3.42	3.95	4.23	4.90	5.80

## V. DISCUSIÓN

Los valores promedios de la concentración inicial de cloruros por peso están dentro del rango 0.0165 - 0.0263 %Cl/wt de la muestra. Estos valores están por debajo de la concentración umbral que es del 0.4%, concentración basada en el contenido de cemento y aceptada por muchos países, especialmente de Latinoamérica<sup>4,5,8</sup>. Esta concentración puede provenir de la composición química

del cemento o de la composición química del agua empleadas y que se encuentran combinadas probablemente con las fases aluminicas y/o ferríticas del cemento.

Los perfiles de concentración muestran que la difusión de cloruros en concreto depende significativamente de la relación agua/cemento y del tiempo de curado, el cual tiene influencia en la permeabilidad de la superficie de la probeta o de las zonas cercanas a ella de lo cual se puede establecer que para las diferentes relaciones agua/cemento la concentración de cloruros aumenta a medida que la distancia disminuye debido principalmente a que la densidad del concreto depende de la cantidad de cemento agregado haciéndose mayor a medida que la cantidad de cemento disminuye en la mezcla<sup>4,5</sup>. La concentración de cloruros aumenta a medida que el tiempo de curado es mayor, particularmente en las zonas más cercanas a la superficie por lo que es posible predecir la conducta de los iones cloruro si se cumplieran las condiciones de la segunda ley de Fick en las probetas.

Estas gráficas además muestran que la difusión de cloruros en concreto depende significativamente de la relación agua/cemento y del tiempo de curado, el cual tiene influencia en la permeabilidad de la superficie de la probeta o de las zonas cercanas a ella.

Con los datos obtenidos se establecieron valores del coeficiente de difusión los cuales no alcanzaron el orden de  $10^{-11} \text{m}^2/\text{seg}$  que generalmente se reportan en los trabajos de investigación; nuestros resultados en cuanto al coeficiente de difusión se refiere fueron del orden de  $10^{-10} \text{m}^2/\text{seg}$  y  $10^{-9} \text{m}^2/\text{seg}$ , coincidiendo con E.J. Garbozzi y D.P. Bentz<sup>14</sup> quienes reportan coeficientes de difusión aparente del orden de  $10^{-9}$  e indican que estos valores de los coeficientes de difusión, determinados experimentalmente, tienen que corregirse con los valores de las mediciones de porosidad capilar y del grado de hidratación de la pasta de cemento.

El comportamiento de nuestra prueba experimental probablemente se debe a que aun cuando la dosificación del concreto y el diseño de mezcla muestran que las proporciones han sido adecuadas, probablemente en el momento del moldeo de las probetas los niveles de porosidad generados por la pasta de cemento endurecida fueron altos, ello permite que el grado de hidratación y la cantidad de pasta de cemento se modificaran dando lugar a que las probetas no cumplan con la condición de homogeneidad. La densidad del concre-

to es la propiedad más importante del mismo, a los efectos de su resistencia a la penetración de los agentes agresivos, y ésta es inversamente proporcional a la porosidad, por lo tanto, si el moldeo ha perdido densidad, la porosidad resulta alta. Todas las consideraciones anteriores pueden haber modificado los mecanismos de difusión de los cloruros.

A continuación se muestran secciones cortadas y fracturadas de probetas expuestas al microscopio estereográfico donde se observan gran cantidad de poros con dimensiones en el rango de 0,5 hasta 3 mm de diámetro y profundidad de 0,25 a 1,5 mm. También se observaron fisuras en menor cantidad, particularmente en zonas cercanas a los agregados gruesos, así como una distribución no uniforme de los agregados por lo que es importante continuar con las investigaciones a fin de determinar coeficientes verdaderos de difusión que nos permitan entender más al detalle los mecanismos de cómo los cloruros provenientes de la zona costera actúan para iniciar la corrosión del acero de refuerzo en las estructuras de concreto.

## VI. CONCLUSIONES

1. La concentración inicial de cloruros en las probetas se mantiene por debajo del valor umbral considerado para que el acero de refuerzo se despasive.
2. Existe una ligera dependencia entre la concentración inicial de cloruros y los tiempos de curado de las probetas de concreto. A menor tiempo de curado, en general es mayor la concentración de cloruros, esto se cumple desde la relación agua/cemento 0.45 hasta la relación agua/cemento 0.60. Para las probetas de relación agua/cemento de 0.65 cambia la tendencia, ya que cuando es mayor el tiempo de curado se presenta mayor concentración de cloruros.
3. Los ensayos de inmersión de las probetas de concreto en agua de mar artificial durante 30 días revelaron que:
  - a) La concentración de cloruros/peso de muestra varía con la profundidad de penetración (perfiles de concentración) siguiendo la tendencia típica de la difusión de cloruros en concreto.
  - b) A mayor relación agua/cemento, los valores de la concentración de cloruros para una profundidad de penetración dada son generalmente mayores.

- c) Los valores de las concentraciones superficiales de cloruros aumentan a medida que la relación agua/cemento y el tiempo de curado se incrementan. Ambas variables influyeron directamente en la difusión de cloruros en las probetas de concreto utilizadas.

## VII. BIBLIOGRAFÍA

1. Winter, G. y Nilson, A. (1993). *Hormigón y armaduras*. Cornell University Ed. UK, Cap. 1 pp. 1-39.
2. Ramírez Cruz, E. (1997). *Técnicas avanzadas para la medición y control en estructuras de concreto armado*. Ed. IPC-PUCP, Lima, pp. 1-3.
3. Callister W. D. Jr. (1995). *Ciencia e Ingeniería de los materiales*, 3.<sup>a</sup> ed., Reverté S.A. Barcelona.
4. Morris, W. (1996). *Corrosión y durabilidad de estructuras de hormigón armado y protección de la corrosión en el hormigón armado*. División de corrosión INTEMA. Mar del Plata (Buenos Aires), pp. 2-16.
5. Swedish Cement and Concrete Research Institute (1997). *Service Life of Concrete Structures-in a Chloride Environment*, Estocolm CBI Report 1:97. pp. 1-63.
6. Wietek, B. (1996) *A Corrosion Monitoring System for Steel Reinforced Concrete. Structures in Civil Ingeniering*. Ed. CMS. Gmbh-A-6073 Innsbruck-Sistrans 290, Austria.
7. Maldonado, L. (1996). *Corrosión del acero de refuerzo: Revisión del estado del arte en México*. Dpto. de Física Aplicada, Ed. Cinvestav-Mérida, México.
8. CYTE. RED TEMÁTICA XVB (1997). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión de estructuras de hormigón armado*. Río de Janeiro.
9. Wietek, B. y Kunz, E.G. (1996). *Permanent Monitoring for Reinforced and Prestressed Concrete Structures*. Ed. CMS Gmbh-A-6073 Innsbruck-Sistrans 290, Austria.
10. Garboczi, E.J.; Seliwartz, L.M. y Bentz, D.P. «Modelling the Interfacial Zone on the Conductivity and Diffusivity of Concrete». *Journal of Advanced Cement Based Material*, vol 2, 169-181, 1995.
11. Castro, L.; Maldonado R. y de COSS. «Study of Chloride Diffusion as a Corrosive Agent in Reinforced Concrete for a Tropical Marine Environment». *Corrosion Science*, vol. 35. 5-8 pp. 1557-1562, De. Pergamon Press Ltd. Vk 1993
12. Maldonado, L.; Castro, P.; Marrufo, J.; González, W. y Zapata, A. *Bon Loss Between Epoxy and Alkyd Coated Reinforcement Rebars and Concrete*. Pub. Corrosion Forms and Control for Infrastructure, ASTM STP 1137. Ed.
13. Dhir, R.K. *et al.* «Rapid Estimation of Chloride Diffusion Coeficient in Concrete», *Magazine of concrete Research*, vol. 42, N.º 152, pp. 177-185, 1990.
14. Garbozzi, E.J. y Bentz, D.P. *Determination of the Coeficient of Chloride Ion Diffusion*, pp. 1-5. Servicio Internet <http://ciks.cbt.gov/> 1998.