

Revista de Ingeniería

ISSN: 0121-4993

reingeri@uniandes.edu.co

Universidad de Los Andes

Colombia

Santamaría Díaz, Naliett Karina; Yamín Lacouture, Luis Eduardo; Arcila López, Carlos Alberto

Resistencia a los cloruros en el concreto adicionado con escoria de alto horno

Revista de Ingeniería, núm. 23, mayo, 2006, pp. 48-57

Universidad de Los Andes

Bogotá, Colombia

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=121014221006>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

 redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal  
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

Recibido 3 de marzo de 2006, aprobado 5 de mayo de 2006

# Resistencia a los cloruros en el concreto adicionado con escoria de alto horno

**Naliett Karina Santamaría Díaz**

Ingeniera Civil de la Universidad Nacional. Msc en Ingeniería Civil. Universidad de los Andes.

**Luis Eduardo Yamín Lacouture**

Director de tesis. Profesor asociado, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Universidad de los Andes

**Carlos Alberto Arcila López**

Asesor Externo. Sika, Bogotá, Colombia

## PALABRAS CLAVE

concreto, cloruro, corrosión, escoria de alto horno, curado, resistencia a compresión, porosidad.

## KEY WORDS

concrete, chloride, corrosion, blast-furnace slag, curing, strength, porosity.

**RESUMEN** Para evaluar la resistencia a los cloruros en diferentes mezclas de concreto se realizó el ensayo de permeabilidad rápida a cloruros, estipulado en la norma ASTM 1202 [1]. Para ello se utilizó un equipo hecho en el país que sigue los requerimientos dados por esta norma. Se ensayaron concretos con 6 diferentes relaciones agua/cimentante (a/c) y tres porcentajes de adición de escoria en reemplazo de parte del cemento. Aunque la edad a la que se evaluaron las muestras de concreto fue la misma, también se varió el tiempo de saturación de las muestras en agua.

**ABSTRACT** For determining the chloride resistance of different concrete samples, the rapid chloride permeability test was used. This procedure has been established in the standard test method ASTM 1202 [1]. For this purpose, national equipment was used. It follows the specifications of the method. The tested concretes had 6 different water/binder ratios (w/b) and three percentages of blast-furnace slag as a replacement of part of cement. Although the age of the concrete was the same in all the cases, the time of saturation in water was different.

## 1. INTRODUCCIÓN

El deterioro de las estructuras que se encuentran ubicadas cerca del mar se puede presentar por la entrada de los iones cloruro a la matriz de concreto, luego de lo cual éstos pueden llegar a alcanzar el acero de refuerzo e iniciar el proceso de corrosión. Por ello es de vital importancia implementar en nuestro país procedimientos que permitan establecer cuál mezcla de concreto es la más indicada para estos casos.

El objetivo fundamental de la investigación es determinar cómo afecta la adición de escoria de alto horno, el tiempo de curado y la resistencia a compresión de la mezcla en la penetración de los iones cloruro sobre la matriz de concreto, de manera que se puedan dar recomendaciones para aumentar la durabilidad de las estructuras expuestas a este tipo de ambientes.

Investigaciones anteriores elaboradas en otros países han mostrado los beneficios que trae la adición de escoria de alto horno para evitar en alguna medida el paso de los iones cloruro a través del concreto, y así evitar la posible corrosión del acero de refuerzo. Tal es el caso del estudio realizado por Tarek y colaboradores [2] quienes trabajaron con tres grupos de concretos distintos: concreto sin adiciones, adicionado

con ceniza volante y concreto adicionado con escoria. Los resultados mostraron un ingreso de cloruros menor en el concreto con escoria, en comparación a las otras mezclas. Resultados similares fueron encontrados por Misra y colaboradores [3] quienes trabajaron con concretos de diferentes edades. De ahí la importancia de hacer un estudio que evalúe las propiedades de las mezclas diseñadas con materiales nacionales.

## 2. PRINCIPIO DEL ENSAYO

### 2.1 EQUIPO

Para desarrollar una investigación encaminada a este objetivo, se utilizó un equipo basado en la norma ASTM 1202 "Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration" [1] elaborado en el país (Figura 1). Este ensayo permite dar una calificación al concreto evaluando su habilidad para dejar pasar los iones cloruro, y así poder comparar un concreto con respecto a otros.

El equipo de permeabilidad rápida a cloruros mide fundamentalmente la corriente sobre una muestra de concreto por donde están atravesando iones cloruro en una sola dirección. La cantidad de iones que atraviesa la muestra depende de las propiedades resistentes del

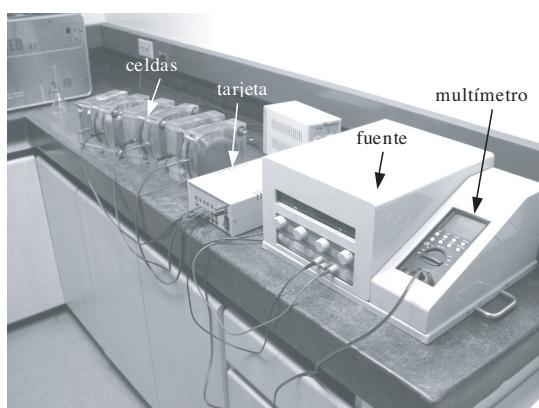


Figura 1. Imagen general del equipo de permeabilidad rápida a cloruros. De izquierda a derecha: Celdas de cloruro, tarjeta que contiene las resistencias, fuente que suministra el voltaje al sistema y multímetro encargado de tomar las mediciones.

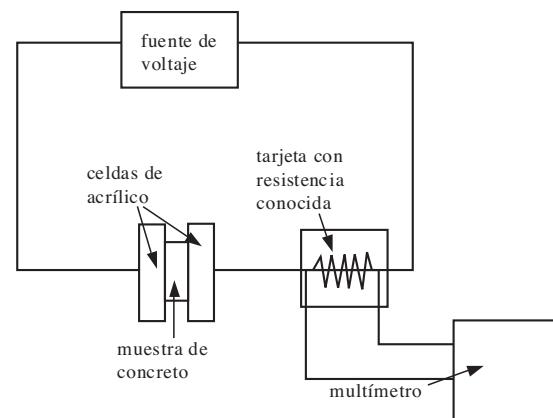


Figura 2. Esquema del circuito que conforma el equipo de permeabilidad rápida a cloruros.

concreto a este paso iónico. Las medidas recolectadas en el ensayo se utilizan para calcular al final la carga eléctrica total que ha atravesado la muestra durante 6 horas, y de esta forma determinar la capacidad del concreto para evitar el paso de iones cloruro.

Este equipo consta de 4 partes específicas: unas celdas, una tarjeta, una fuente de voltaje y un multímetro. Las celdas están hechas en acrílico y son las encargadas de albergar las muestras de concreto en la mitad y ponerlas en contacto en sus extremos con dos líquidos distintos, para generar el proceso de transporte iónico. La tarjeta es la parte encargada de hacer pasar la corriente presentada por el transporte de iones en la muestra de concreto a través de una resistencia conocida y así poder detectar la caída de voltaje relacionada con la corriente que atraviesa la probeta. La fuente de voltaje es la encargada de suministrar el voltaje para acelerar el proceso de transporte iónico y obtener resultados en 6 horas, que es la duración del ensayo. El multímetro es el aparato que mide la caída de voltaje en la resistencia de la tarjeta, y registra este valor cada 3 minutos aproximadamente, para luego poder bajar todos los datos a un computador al final del ensayo. La Figura 2 muestra un esquema del circuito que conforma este equipo.

## 2.2 PROCEDIMIENTO

El procedimiento de ensayo de cloruros comienza dos días antes de evaluar la permeabilidad de la muestra. El primer día se corta una probeta de 10 cm de diámetro y 5 cm de alto de un cilindro más grande que cumpla con ese diámetro. El corte se hace de manera que las dos caras paralelas de la muestra sean lo más horizontales posible y se observe claramente el agregado. No se toman probetas de los extremos del cilindro grande, sino de la parte media. Para tapar la parte horizontal de la muestra, es decir la parte curvada, se aplica un sellante que detenga la salida del líquido en esa dirección. Así los iones cloruro solo tienen una dirección por la cual desplazarse: ésta es entre las dos caras paralelas de la probeta. El sellante aplicado se deja secar.

Al segundo día se somete la probeta al vacío. Para esto se utiliza una bomba de vacío que pueda generar una presión de 1 mm de mercurio. La probeta se introduce en un compartimiento que se pueda sellar herméticamente y tenga una conexión a la bomba de vacío. Se somete la muestra al vacío durante 3 h a la presión indicada (1 mm Hg). Pasadas las 3 horas se mide una cantidad de agua previamente hervida y enfriada a temperatura ambiente, para llenar el compartimiento que contiene la muestra, que en este caso es un recipiente metálico.

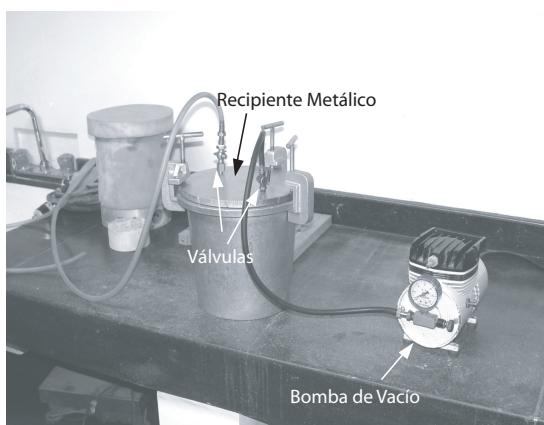


Figura 3. Equipo de vacío para la saturación de las muestras

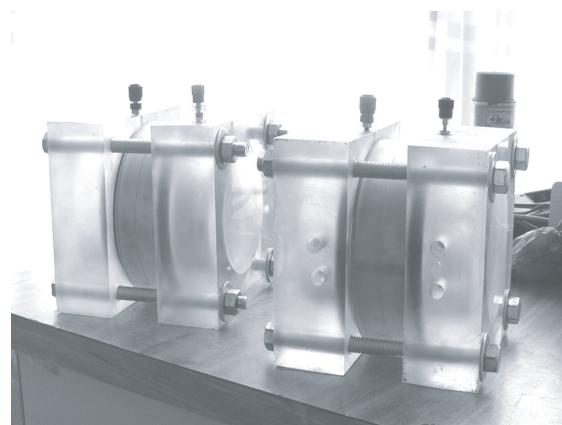


Figura 4. Celdas de acrílico sujetas a la probeta de concreto por medio de tornillos

Este tiene una válvula unida a una manguera por medio de la cual se introduce el agua sin necesidad de destaparlo (Figura 3). Se incorpora el agua y se deja la presión por 1 h más. Este procedimiento se hace con el objetivo de sacarle el aire a la muestra y prepararla para que sea más factible la generación de canales por donde puedan fluir los iones cloruro. Luego de terminar el proceso de saturación se deja la muestra sumergida en el agua durante 18 h.

Al tercer día, es decir el día del ensayo, se extrae la muestra del agua y se coloca entre las celdas del equipo de cloruros. Se atornilla hasta que las celdas y la muestra de concreto queden sin espacios entre sí (Figura 4). Por un pequeño agujero que tiene cada celda se introduce en una de ellas cloruro de sodio al 3% (NaCl) y en la otra hidróxido de sodio al 0.3% N (NaOH) hasta que se llenen por completo los compartimentos. Estos líquidos son los que contienen los iones que van a pasar de un lado a otro de la muestra de concreto. Luego se procede a hacer todas las conexiones pertinentes y se aplica el voltaje estipulado, que debe ser de 60 V de acuerdo a la norma [1].

El ensayo dura 6 horas, luego de las cuales se recogen los datos de voltaje tomados por el multímetro y se introducen a un software que los divide por el valor de la resistencia en la tarjeta para hallar los datos de corriente en cada lapso de tiempo. Finalmente, el sistema calcula la integral de corriente vs. tiempo, de manera que se obtiene la carga total (en unidades de coulombs) que pasa por la muestra durante las 6 horas. La Tabla 1 muestra la calificación dada por la norma

CARGA QUE PASA COULOMBS	PENETRABILIDAD DEL IÓN CLORURO
>4000	Alta
2000 - 4000	Moderada
1000 - 2000	Baja
100 - 1000	Muy Baja
<100	Despreciable

Tabla 1. Penetrabilidad del ión cloruro basada en la carga que pasa, según la norma ASTM 1202 [1]

ASTM 1202 [1] a un concreto para los diferentes rangos de iones que pueden atravesar la probeta.

### 3. VARIABLES DE ESTUDIO

#### 3.1 ETAPA DE CALIBRACIÓN

Para la etapa de calibración del equipo sólo se utilizaron tres tipos de concreto. Todos tenían la relación agua/cimentante (a/c) de 0.84 y cemento tipo III, pero con tres diferentes porcentajes de escoria: 0% escoria, 26% de escoria y 40% de escoria (este porcentaje es obtenido del cementante total). También se introdujo como variable el nivel de voltaje con el que se hacía el ensayo, para determinar cuál de ellos era el más indicado de los corrientemente usados para esta prueba. Se hicieron ensayos con 15, 30 y 60 V. La edad del concreto estaba entre los 50 y 60 días. La Tabla 2 muestra las características del cemento y la escoria utilizados en las mezclas de concreto.

#### 3.2 ETAPA DE ENSAYOS DEFINITIVOS

En la etapa de los ensayos definitivos se utilizaron 6 diferentes relaciones a/c: 0.84, 0.74, 0.67, 0.55,

COMPOSICIÓN DE LA ESCORIA DE ALTO HORNO					
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Sulfuro
%	%	%	%	%	%
46.1	27.14	13.21	1.17	1.26	
Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Alcalis (Equivalente Alcalino)			
%	%				
0.21	0.33	0.43			

COMPOSICIÓN DEL CEMENTO TIPO III						
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	
%	%	%	%	%	%	
63.95	20.33	4.63	3.17	0.88	2.41	
C <sub>3</sub> A	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	(Equivalente Alcalino)			
%	%	%				
6.92	0.09	0.72	0.56			

Tabla 2. Características del cemento y la escoria utilizados en los ensayos.

0.51 y 0.46 con cemento tipo III en todos los casos. El voltaje utilizado sería uno solo y lo daría la etapa previa de calibración, de acuerdo a la consistencia de los resultados obtenidos. También se varió el porcentaje de escoria en las mismas proporciones de la etapa de calibración. Aunque todas las muestras se ensayaron a 90 días se modificaba el tiempo de saturación en la piscina de curado, de tal forma que un grupo de tres muestras ensayadas a los 90 días hubiera tenido una saturación previa en la piscina durante 14 días, mientras que otro grupo de tres se ensayaba a los mismos 90 días, pero con el tiempo de saturación anterior de sólo 7 días.

Para la realización de los ensayos se escogieron como variables principales la relación a/c, el tiempo de saturación o curado y el porcentaje de escoria. Las dos primeras se seleccionaron por la importancia vital que tienen en la conformación de un concreto de resistencia y desempeño mecánico adecuados.

La variación del porcentaje de escoria usada tenía como objetivo indicar cuál era la cantidad óptima para el desarrollo de un concreto resistente a los cloruros.

Adicionalmente se hicieron ensayos de resistencia a compresión simple para todas las fundidas y a edades de 3, 7, 28 y 56 días. También se realizaron ensayos de absorción, densidad, porosidad, velocidad de onda de ultrasonido y módulos de elasticidad en las muestras de concreto. El ensayo de velocidad de ultrasonido consistía en hacer pasar ondas por el cilindro de concreto, de tal forma que se midiera el tiempo que requieren dichas ondas para atravesar la probeta. Se elaboró dos veces la fundida con relación a/c de 0.84, para que se pudieran obtener porcentajes de variación con respecto a la repetitividad de los ensayos. En la Tabla 3 se resumen los ensayos realizados.

ENSAYO DE PERMEABILIDAD RÁPIDA A CLORUROS						
PRUEBAS CON 14 DÍAS DE SATURACIÓN Y 90 DÍAS DE EDAD						
PORCENTAJE DE ESCORIA	RELACIÓN A/C					
	0.84	0.74	0.67	0.55	0.51	0.46
0%	3*	3	3	3	3	3
26%	3	3	3	3	3	3
40%	3	3	3	3	3	3

ENSAYO DE PERMEABILIDAD RÁPIDA A CLORUROS						
PRUEBAS CON 7 DÍAS DE SATURACIÓN Y 90 DÍAS DE EDAD						
PORCENTAJE DE ESCORIA	RELACIÓN A/C					
	0.84	0.74	0.67	0.55	0.51	0.46
0%	3	3	3	3	3	3
26%	3	3	3	3	3	3
40%	3	3	3	3	3	3

ENSAYOS DE VELOCIDAD DE ONDA DE ULTRASONIDO						
PORCENTAJE DE ESCORIA						
PORCENTAJE DE ESCORIA	RELACIÓN A/C					
	0.84	0.74	0.67	0.55	0.51	0.46
0%	6****	6	6	6	6	6
26%	6	6	6	6	6	6
40%	6	6	6	6	6	6

ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN SIMPLE						
PORCENTAJE DE ESCORIA	RELACIÓN A/C					
	0.84	0.74	0.67	0.55	0.51	0.46
0%	12**	12	12	12	12	12
26%	12	12	12	12	12	12
40%	12	12	12	12	12	12

ENSAYOS DE ABSORCIÓN, DENSIDAD Y POROSIDAD						
PORCENTAJE DE ESCORIA	RELACIÓN A/C					
	0.84	0.74	0.67	0.55	0.51	0.46
0%	3***	3	3	3	3	3
26%	3	3	3	3	3	3
40%	3	3	3	3	3	3

\* Número de muestras ensayadas. La mezcla con relación a/c de 0.84 se realizó 2 veces.

\*\* En todos los casos se ensayaron 3 muestras a cada edad. Las edades fueron 3, 7, 28 y 56 días.

\*\*\* Se ensayaron 3 muestras a los 28 días de edad.

\*\*\*\* Se ensayaron 3 muestras a los 28 días de edad y 3 a los 56 días de edad.

Tabla 3. Resumen de las pruebas realizadas y número de muestras ensayadas

## 4. RESULTADOS

### 4.1 ETAPA DE CALIBRACIÓN

Para verificar si la obtención de resultados experimentales a través del aparato de permeabilidad y el software nuevos eran adecuados, se ensayaron muestras de concreto obtenidas de la misma bachada, con el mismo proceso de curado y a igual edad en este equipo y en un equipo importado. Estas pruebas se hicieron con 60 V en la fuente y los tres porcentajes de escoria ya mencionados. La Tabla 4 muestra los resultados y porcentajes de variación obtenidos.

Por efectos de disponibilidad de muestras fue posible hacer más ensayos en los dos equipos con probetas que contenían 0% de escoria. Se hicieron cesiones de estos ensayos durante dos días (filas 4 y 5 de la Tabla 4). Las pruebas con muestras que contenían 26% y 40% de escoria se elaboraron en un solo día (filas 6 y 7 de la Tabla 4).

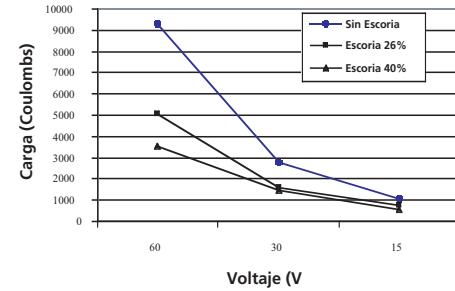


Figura 5. Carga total vs. voltaje utilizado para los diferentes porcentajes de adición. Relación agua cementante (a/c) de 0.84 y 50 días de edad.

Al comparar los resultados obtenidos en los dos equipos, se observa una diferencia en los datos del 20% en promedio, y la norma acepta diferencias entre dos laboratorios distintos del 51%. Además, en todos los casos y sin excepción alguna la calificación dada a los concretos de acuerdo a la Tabla 1 fue la misma en los dos equipos. También se observa que para las

Adición	EQUIPO NACIONAL		EQUIPO IMPORTADO	
	Carga	Carga	porcentaje de variación (%)*	Permeabilidad
%	coulombs	coulombs		
0	9581.7	8100		Alta
	9641.9	7961	21.1	Alta
	8659.5	8215		Alta
0	7417.8	6810	8.9	Alta
	-	7734		Alta
26	4507.6	6184	27.1	Alta
	-	5984		Alta
40	3447.5	2944	25	Moderada
	-	2760		Moderada

\* Se presentan los porcentajes máximos de variación para los grupos de muestras ensayadas

Tabla 4. Resultados comparativos para el ensayo de permeabilidad rápida a cloruros en el equipo nacional y en el equipo importado

probetas con 40% de escoria y parte de las que no tenían escoria los valores en el equipo nacional fueron mayores que los del equipo importado. En el caso de las probetas con 26% de escoria los valores en el equipo nacional resultaron menores, y en la parte restante de las muestras ensayadas en un día y correspondientes a concreto sin escoria, el valor en el equipo nacional estuvo en el medio de los obtenidos en el equipo importado. No se observa una tendencia definida.

Por otro lado, para conocer el comportamiento del equipo nacional frente a ciertas variaciones se hicieron ensayos con los tres porcentajes de adición y los tres voltajes en la fuente ya mencionados. Los resultados se muestran en la Figura 5. En esta gráfica se observa que el ensayo resulta ser mucho más sensible a los 60 V, es decir que las diferencias entre los tres concretos (mezclas con diferentes porcentajes de adición) son más notorias para este voltaje. Como el objetivo principal era comparar unos concretos con otros es muy útil el resultado arrojado por los ensayos a 60V. Por esta razón y porque lo especifica la norma estandarizada [1], las fundidas definitivas se ensayaron a 60V.

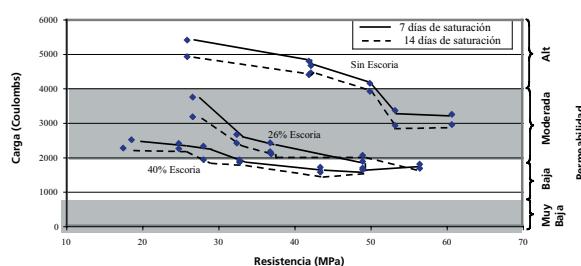


Figura 6. Carga total vs. resistencia a compresión a los 28 días para los dos tiempos de saturación.

#### 4.2 ETAPA DE ENSAYOS DEFINITIVOS

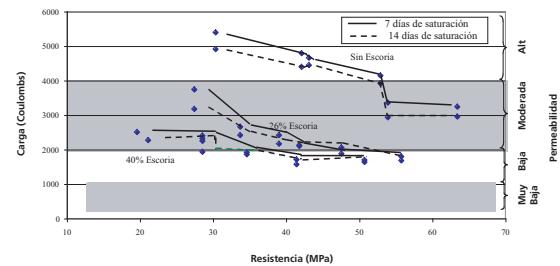


Figura 7. Carga total vs. resistencia a compresión a los 56 días para los dos tiempos de saturación.

La Figura 6 muestra la carga que atravesó las muestras vs. la resistencia a compresión del concreto para 28 días de edad y los dos períodos de saturación estudiados (7 y 14 días). La Figura 7 muestra las mismas variables pero para resistencias a compresión de 56 días de edad. Los porcentajes de reducción de la carga son en promedio del 45% entre las mezclas sin escoria y las mezclas con 26% de escoria, del 59% entre las mezclas sin escoria y con 40% de escoria, y del 26% para el cambio de mezcla con 26% de escoria a 40% de escoria. Esto se explica porque la escoria reacciona con el hidróxido cálcico  $\text{Ca(OH)}_2$  proveniente de la hidratación del cemento, lo que permite modificar la estructura porosa del concreto progresivamente a medida que aumenta su edad, y por lo tanto reduce el paso de los iones cloruro.

Además de esto se observa que en términos generales hay una reducción de la carga que atravesó la muestra con un aumento en la resistencia a compresión del concreto. Esto se explica porque la porosidad del concreto está directamente relacionada con la resistencia que tenga la muestra. Por eso para resistencias a compresión altas se espera que estos concretos tengan mucha más resistencia al paso de los iones, como sucedió en la presente investigación.

Al comparar los resultados obtenidos entre los datos a los 7 y 14 días de saturación, se observa que a

excepción de dos datos, se presenta menor paso de iones con 14 días de saturación, tanto para los concretos adicionados como para los que no tenían adición. Esto demuestra la importancia vital de agua de curado en el proceso de conformación final del concreto. Es importante anotar que las mayores diferencias entre los dos días de saturación se presentaron para el concreto sin adiciones. Esto indica que en el periodo de saturación las mezclas de concreto sin adiciones se hidrataron rápidamente, en comparación a las otras. Sin embargo se observó en el comportamiento global de los resultados, que las cargas obtenidas fueron mucho menores en el concreto adicionado, para todas las mezclas estudiadas. Este efecto de reducción drástica de la permeabilidad del concreto sin adiciones no alcanza a generar una estructura porosa para evitar el paso de los iones cloruro en un nivel similar al del concreto con escoria. Sólo para las resistencias más altas (50 y 60 MPa) el concreto no adicionado tiene una permeabilidad a los cloruros igual a la alcanzada en el concreto adicionado con 26 % de escoria, pero este último tiene resistencias de tan sólo 30 MPa. En este caso, el concreto con adiciones tiene un proceso de hidratación más efectivo.

Las resistencias a compresión del concreto fueron inversamente proporcionales a la relación agua/cimentante (a/c). Para las menores relaciones a/c se presentaron las mayores resistencias. Si se comparan las resistencias obtenidas entre los concretos adicionados y sin adicionar, se observó que hay una reducción de la misma para los concretos con adiciones: de 10% en promedio entre concretos sin adiciones y con 26% de escoria, de 27% entre concretos sin escoria y concretos con 40% de escoria; y de 19% entre concretos con 26% de escoria y 40% de escoria.

El rango de resistencias obtenido para el concreto con 40% de escoria fue de 20 a 50 MPa, de 28 a 55 MPa para el concreto con 26% de escoria, y de 30 a 65 MPa en un concreto sin adiciones. Esto muestra que los concretos con un reemplazo de escoria, a pesar de tener una relación agua/cimentante (a/c) igual que

el concreto no adicionado, no alcanzan los valores de resistencia de este último.

Los datos de absorción, densidad, porosidad y velocidad de ultrasonido indicaron mayor número de poros en el concreto adicionado con escoria. Inicialmente se pensó que estos resultados eran debidos a la diferencia de edad entre los ensayos, ya que la mayoría de estos se realizaron a 28 días, mientras que los de permeabilidad a cloruros a 90 días (fundidas definitivas). Pero las velocidades de ultrasonido mostraban un comportamiento poroso del concreto adicionado a los 56 días de edad, y los ensayos de permeabilidad a cloruros de la etapa de calibración fueron hechos a 50 y 60 días de edad del concreto. Para esta edad el material ya presentaba reducciones altas de permeabilidad a los cloruros al aumentar el porcentaje de adición.

Por esta discrepancia entre la porosidad del concreto y la capacidad para dejar pasar los iones cloruro, se formularon hipótesis que trataran de explicar lo que puede causar tal diferencia:

- Para el transporte de iones cloruro a través de la matriz de concreto es necesario que la estructura porosa del mismo tenga cierta continuidad y forme canales adecuados por los que puedan desplazarse los iones cloruro. Los poros individuales no son los que permiten el paso de los cloruros, sino la conexión entre ellos es la que hace las sustancias nocivas llegar a la parte interna del concreto. Por eso es posible que aunque las mezclas de concreto adicionadas sean menos densas y alcancen mayor porosidad que los concretos no adicionados, éstos sean poros cerrados y no conectados. Su tamaño con relación a toda la muestra evaluada puede ser considerable, pero si la escoria no da una continuidad porosa, los cloruros no pueden penetrar.

- El tamaño de los poros en los concretos adicionados se pudo haber reducido considerablemente, pero el número de estos pequeños poros pudo haber aumentado. Es por eso que la medida de porosidad de una muestra resulta ser mayor para las mezclas con escoria.

Sin embargo la reducción en el diámetro de los poros puede haber sido tal que genera canales para el paso de los iones cloruro muy irregulares, tortuosos y angostos, lo que hace que el transporte de los cloruros disminuya, o al menos tenga menor velocidad.

- El aumento de la porosidad puede deberse al aumento de volumen de unos poros de la muestra, pero no de toda la estructura porosa del concreto. Se sabe que a mayor cantidad de agua en la mezcla los procesos de hidratación son más irregulares.

Es posible que debido a la hidratación de la escoria (la cual involucra sustancias que contienen agua) unida a la hidratación del cemento, el agua total tomada haya sido mayor, en comparación a una mezcla compuesta solamente por cemento. Esto pudo haber generado diferencias marcadas en el tamaño de los poros. Es decir, que un porcentaje de los vacíos tuviera un tamaño elevado, mientras el otro gran porcentaje haya permanecido con un tamaño reducido. El aumento de volumen de sólo un sector de los poros puede no tener mayor influencia sobre la permeabilidad del concreto con escoria, pero sí sobre el valor de porosidad total de la muestra.

Los procesos anteriormente mencionados pudieron actuar de forma individual o combinada para dar explicación a los comportamientos observados en el laboratorio y a los resultados obtenidos sobre las muestras de concreto.

Los ensayos de módulos de elasticidad no mostraron un comportamiento definido para los diferentes porcentajes de adición. Sólo se observó que este módulo aumentaba, como era lógico, al reducir la relación a/c.

El porcentaje de variación máximo para el ensayo de cloruros entre las dos mezclas iguales (con relación agua/cementante de 0.84) fue de 31.7%. La norma [1] no da un valor máximo de variación para los ensayos de muestras de diferente bachada, sino de probetas obtenidas de una misma mezcla. Sin embargo, se esperaría que la variación entre las probetas de diferente bachada pero con las mismas

proporciones, materiales y características tuviera valores similares o mayores al dado por la norma [1] para muestras de una misma bachada, que en este caso es del 42%. En ningún ensayo realizado este número fue superado.

## 5. CONCLUSIÓN

De acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio, para proteger a las estructuras ubicadas cerca del mar y que se encuentran bajo la acción de los cloruros se deben utilizar mezclas con adición de escoria de alto horno (la misma usada en la presente investigación) en un porcentaje que esté alrededor del 25 % del total de material cementante, relaciones agua/cementante inferiores o iguales a 0.51 y mezclas con resistencias a compresión elevadas (en lo posible iguales o superiores a 40 MPa). Concretos con estas características presentaron permeabilidades a los cloruros de 2000 coulombs. Esto permite catalogar el material como un concreto con permeabilidad baja a los cloruros.

También es recomendable la implementación de técnicas adecuadas de curado en obra, que permitan como mínimo mantener el agua de mezcla dentro de los elementos estructurales durante los primeros días de conformación.

## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS Y BIBLIOGRAFÍA

[1] ASTM Committee. ASTM C 1202.

*Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.*

West Conshohocken. 1997.

[2] Tarek Uddin Mohammed, Toru Yamaji & Hidenori Hamada.

*"Chloride Diffusion, Microstructure, and Mineralogy of Concrete after 15 Years of Exposure in Tidal Environment".*

*ACI Materials Journal.* May – June 2002. pp. 256 – 263.

[3] S. Misra, A. Yamamoto, T. Tsutsumi, & K. Motohashi  
“Application of Rapid Chloride Permeability  
Test to Quality Control of Concrete”  
*Concrete Durability. Proceedings*, 6th International  
Conference on Durability of Building Materials and  
Components. Omiya, Japan, October 1993.

[4] J. C. Díaz  
“Evaluación de Concretos Diseñados por  
durabilidad”  
Centro de tecnología del concreto, Cemex – Colombia.  
*Revista Noticreto* No. 71. Criterios de Durabilidad  
del Concreto. Mayo – Julio de 2004. pp. 34 – 41.

[5] M. Jiang, H. Zhang, & M. Malhotra  
“Evaluation of test methods for determining the  
resistance of concrete to chloride ion penetration”  
ACI publication.

[6] B. Martínez, J.J. Flores, R. Uribe, & O. Medina  
“La prueba de permeabilidad rápida a cloruros  
como índice de durabilidad de las estructuras de  
hormigón”  
*Mater Construcc.* México. 2003. Vol. 53: pp. 165 – 177.

[7] K.D. Stanish, R.D. Hooton & Thomas, M.D.A.  
Testing the chloride penetration resistance of  
concrete: a literature review  
Department of civil engineering. University of Toronto, Canada. 1997: pp. 1 – 31.