

## REVISIÓN DE LOS MÉTODOS DE PRUEBA PARA EVALUAR LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN

Aire Carlos  
Dr. en Ingeniería  
Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México  
aire@pumas.iingen.unam.mx

### RESUMEN

La durabilidad del hormigón es vital para la vida útil de una estructura. La importancia de la durabilidad del hormigón no puede subestimarse. La durabilidad del hormigón se define simplemente como su capacidad para resistir la acción de la intemperie y el ataque químico, manteniendo las propiedades de ingeniería deseadas. Actualmente, existen normativas internacionales, como las del ASTM, UNE y recomendaciones del ACI, que presentan parámetros relacionados con la durabilidad del hormigón en estructuras expuestas a diferentes ambientes. Este artículo presenta una revisión de los métodos de prueba que se emplean para evaluar la durabilidad del hormigón.

### ABSTRACT

*The durability of concrete is vital with regards to a structure's lifespan. The importance of concrete durability cannot be underestimated. Concrete durability is simply defined as its ability to resist weathering action and chemical attack, while maintaining the desired engineering properties. Currently, there are international standards, such as ASTM, UNE and ACI recommendations, which present parameters related to the durability of concrete in structures exposed to different environments. This article presents a review of the test methods used to evaluate the durability of concrete.*

## INTRODUCCIÓN

El hormigón como material de construcción en los nuevos proyectos de infraestructura requiere cumplir nuevos requerimientos además de satisfacer con el requisito de resistencias mecánicas, entre ellos su capacidad de soportar agentes externos a los cuales estará expuesto.

Los agentes externos y condiciones de exposición a los cuales están expuestas las estructuras son cada vez más agresivos y las estructuras requieren actualmente mayor tiempo de vida útil, por lo que exigen que los hormigones muestren un buen desempeño frente a estos requerimientos.

Para tener una estructura de hormigón sustentable, la durabilidad es clave. El uso de materiales inadecuados, las malas prácticas de construcción, el curado y los diseños de las mezclas, hacen que las estructuras de hormigón muestren a menudo un grave deterioro prematuro. Este es un problema general que provoca gastos adicionales a los sectores público y privado de todo el mundo.

Medir la durabilidad del hormigón para determinar su longevidad en servicio es un reto. Sin embargo, es importante para determinar cómo serán las estructuras a largo plazo. Normalmente se especifican pruebas como la absorción de agua, la absorción superficial, la permeabilidad al agua o la permeabilidad al cloro. Estas pruebas deben tener en cuenta las principales propiedades del diseño de la mezcla cuando se utilizan para determinar la durabilidad del hormigón.

Actualmente, existen algunas normativas internacionales, como las del ASTM, UNE y recomendaciones del ACI, que presentan parámetros relacionados con la durabilidad del hormigón en estructuras expuestas a diferentes ambientes. Algunas de estas pruebas tienen algunas limitaciones y es necesario entenderlas y reconocerlas. Se presenta una revisión y análisis de las principales pruebas.

## PRUEBAS DE ABSORCIÓN DE AGUA-BS 1881 Y ASTM C1585

*Descripción:* Los ensayos de absorción son un método común para determinar la resistencia al agua. Pruebas como la BS 1881-122 y ASTM C1585 miden la cantidad de agua que penetra en las muestras de hormigón cuando se sumergen. Una baja absorción es un resultado positivo.

*Dónde es más útil:* El ensayo está destinado a determinar la susceptibilidad del hormigón no saturado a la penetración del agua, tanto para el hormigón superficial como para el interior.

*Limitaciones:*

- Tiempo de inmersión corto en comparación con las condiciones de servicio a largo plazo.
- No tiene en cuenta ningún proceso reactivo que fije el agua

- Asume que todo el aumento de peso es agua y no procesos reactivos
- Puede ser engañoso cuando se utilizan aditivos como los aditivos impermeabilizantes cristalinos hidrofílicos.

*Pruebas de absorción:* mide la cantidad de agua que penetra en las muestras de hormigón cuando están sumergidas, pero no tiene en cuenta el uso inherente del agua en el proceso de cristalización, especialmente en las primeras fases del curado (menos de 28 días).

Los resultados del ensayo de absorción mejorarán con el tiempo a medida que los cristales sigan creciendo. Por lo tanto, para los aditivos cristalinos, la prueba de absorción a edades más avanzadas (56 o 90 días) dará resultados más realistas.

## **PRUEBAS DE CLORUROS**

### **PRUEBA RÁPIDA DE PERMEABILIDAD A LOS CLORUROS-ASTM C1202**

*Descripción:* El ensayo de permeabilidad rápida al cloruro (RCPT) es una prueba eléctrica utilizada para estimar la durabilidad del hormigón. Los métodos de ensayo, como el ASTM 1202, Método de ensayo estándar para la indicación eléctrica de la capacidad del hormigón de resistir la penetración de iones de cloruro, controlan la cantidad de carga eléctrica que pasa a través de muestras cilíndricas durante seis horas. La carga total pasada, en Coulombs, está relacionada con la capacidad de la muestra para resistir la penetración de iones de cloruro. Los niveles más bajos de carga pasada indican una mayor resistencia.

*Dónde es más útil:* El ensayo RCPT ha ganado una amplia aceptación como método relativamente fácil y rápido para determinar la permeabilidad del hormigón. En general, este método de ensayo es adecuado para evaluar los materiales y las proporciones de los materiales con fines de diseño, así como para la Investigación y el Desarrollo. Sin embargo, se ha convertido incorrectamente en uno de los ensayos utilizados para evaluar la durabilidad del hormigón. El RCPT puede calificar una mezcla, pero no necesariamente descalificarla.

El ensayo RCPT no debe utilizarse para determinar con precisión la permeabilidad de las mezclas de hormigón que contienen materiales cementantes suplementarios o aditivos químicos.

*Limitaciones:* Varios inconvenientes hacen que el ensayo no sea fiable, especialmente para comparar diferentes diseños de mezcla o para evaluar la durabilidad del hormigón.

- Puede permitir mediciones prematuras (antes de que se alcance el estado estacionario);
- El alto voltaje aplicado aumenta la temperatura de la muestra y puede provocar cambios físicos y químicos, así como valores irreales;

- La corriente eléctrica que pasa por la muestra indica el movimiento no sólo de los iones de cloruro, sino de todos los iones de la solución de los poros (la conductividad eléctrica de la muestra); por lo tanto, este ensayo puede no representar la permeabilidad real (o potencial) del hormigón que contiene materiales cementantes suplementarios (cenizas volantes, humo de sílice o escoria de alto horno molida) o aditivos químicos (reductores de agua, superplastificantes, inhibidores de corrosión);
- Posibles resultados engañosos debido a la composición química de la solución de los poros, en lugar de la verdadera permeabilidad;
- Baja repetibilidad y reproducibilidad.

## **PRUEBA DE MIGRACIÓN DE CLORUROS-NT BUILD 492 (COEFICIENTE DE DIFUSIÓN)**

*Descripción:* La prueba NT Build 492-Migración de cloruro en estado no estable (coeficiente de difusión), es un método eléctrico, muy similar a la prueba rápida de permeabilidad a los cloruros (RCPT). La muestra para la prueba se corta de un cilindro de 100 × 200 mm. No es necesario recubrirla con epoxi, pero se somete a un acondicionamiento de 24 horas similar al de las muestras RCPT. Durante el período de exposición, la muestra se intercala entre una solución de cloruro de sodio y una solución de hidróxido de sodio. La prueba se realiza durante un tiempo y a una tensión determinada por la corriente inicial de la muestra con una aplicación de 30 V. El tiempo de exposición oscila entre 24 y 96 horas. Una vez finalizada la prueba, la muestra se divide por la mitad y se pulveriza una solución de nitrato de plata sobre la superficie fracturada. Se forma un precipitado blanco de nitrato de plata en la parte de la cara donde hay iones de cloruro. La profundidad de penetración del cloruro se mide como la media de siete mediciones a lo largo de la anchura de la muestra. El coeficiente de difusión se calcula a partir de los valores de penetración del cloruro, el grosor de la muestra, el tiempo de exposición, el voltaje y la temperatura media de la muestra.

*Donde es más útil:* Esta prueba es ligeramente más larga que la prueba RCPT, pero no tanto como la ASTM C1556 (Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion) donde el tiempo de exposición es de treinta y cinco días. Los resultados de ASTM C1556 y NT Build 492 son similares pero no idénticos. El coeficiente de difusión que determina puede utilizarse para predecir la vida útil del hormigón o ayudarnos a diseñar un hormigón más duradero, es decir diseñar el hormigón con criterios de durabilidad.

### *Limitaciones:*

- La prueba no debe utilizarse con hormigón reforzado con fibra de acero o con hormigón que contenga soluciones conductoras, es decir, inhibidor de corrosión

## **PRUEBA DE COEFICIENTE DE DIFUSIÓN DE CLORUROS-ASTM C1556**

*Descripción:* La ASTM C1556-Coeficiente de difusión de cloruros, es otra prueba que se utiliza para evaluar la capacidad del hormigón de resistir la entrada de iones de cloruro. Se emplea cilindros de hormigón de 100 x 200 mm que han curado durante 28 días. Después de 28 días, se cortan las 75 mm superiores del cilindro y se recubre con epoxi toda la superficie excepto la terminada. Una vez que el epoxi está seco, la muestra se sumerge en agua con cal hasta que alcanza un peso constante. A continuación, la muestra se sumerge en una solución de cloruro de sodio durante al menos 35 días. La muestra se seca al aire durante 24 horas. A continuación, se muele 0.975 mm de la cara expuesta. El polvo molido de cada superficie se analiza para determinar el contenido de cloruro. El coeficiente de difusión de la mezcla se determina ajustando una ecuación a los contenidos de iones cloruro medidos mediante el método de análisis de regresión de mínimos cuadrados.

*Donde es más útil:* Es un buen método para medir el coeficiente de difusión aparente de una mezcla de hormigón. La norma ASTM C1556 también es útil para predecir la vida útil de una estructura de hormigón, ya sea una estructura existente o una nueva construcción.

*Limitaciones:* Como mínimo, esta prueba tarda tres meses en completarse. Para el hormigón de alto rendimiento, se recomienda que el tiempo de remojo en la solución de cloruro de sodio se prolongue más allá de los 35 días. *En algunos casos, la prueba NT Build 492, que ofrece resultados similares, puede ser más adecuada.*

## **PRUEBA DE DIFUSIÓN DE CLORUROS-AASHTO T259**

Las verdaderas pruebas de difusión de cloruros, como la AASHTO T 259, tardan mucho tiempo en realizarse (90 días de exposición en solución). Y cuanto mejor es el hormigón, más tiempo tarda. Para un hormigón muy durable, hay que esperar seis meses de exposición a una solución de iones cloruro antes de esperar obtener datos significativos. Si se añade el tiempo que se tarda en fabricar y curar el hormigón antes de la prueba y el tiempo que se necesita para tomar muestras y analizar el hormigón al final, se obtiene una prueba de 8 o 9 meses. Está claro que cualquier prueba de difusión verdadera sólo va a funcionar para la investigación en laboratorio, no para las aplicaciones prácticas en el campo. De ahí el interés de las pruebas indirectas.

*Descripción:* El ensayo AASHTO T259 (comúnmente conocido como ensayo de estanqueidad de sal) es un ensayo a largo plazo para medir la penetración del cloruro en el hormigón. La prueba requiere tres losas de al menos 75 mm de espesor y con una superficie de 300 mm cuadrados. Estas losas se curan en húmedo durante 14 días y luego se almacenan en un en una cámara de secado con una humedad relativa del 50% durante 28 días. Los lados de las losas están sellados, pero la cara inferior y superior no lo están. Tras el periodo de

acondicionamiento, se pone una solución de NaCl al 3% en la superficie superior durante 90 días, mientras que la cara inferior se deja expuesta al entorno de secado. Al final de este tiempo, se sacan las losas del entorno de secado y se determina la concentración de cloruro en rodajas de 12.5 mm de espesor. Normalmente, se toman 2 o 3 a profundidades progresivas. Sin embargo, sólo se determina la concentración media de cloruro en cada trozo de 12.5 mm, no la variación real de la concentración de cloruro a lo largo de esas 12.5 mm. Se puede prever una situación en la que haya dos hormigones con la misma concentración media de cloruro en su rebanada exterior de 12.5 mm. Uno de los hormigones tiene una concentración de cloruro aproximadamente uniforme, mientras que el otro tiene una concentración más alta cerca de la superficie y más baja más adentro. Obviamente, la primera situación dará lugar a una concentración crítica de cloruro que se alcanza a cierta profundidad antes que en la segunda situación, pero esta distinción no se detectaría.

*Donde es útil:* Este método cubre la determinación de la resistencia de las probetas de hormigón a la penetración del ion cloruro. Está destinado a determinar los efectos de las variaciones de las propiedades del hormigón en la resistencia de éste a la penetración de iones cloruro.

*Limitaciones:*

- Es una prueba de larga duración, 90 días después del curado y acondicionamiento.

## **PRUEBA DE PERMEABILIDAD AL AGUA BAJO PRESIÓN-BS EN 12390-8 y DIN 1048/5**

*Descripción:* La BS EN 12390-8 y DIN 1048 Parte 5 son ensayos equivalentes que miden la profundidad de penetración del agua en muestras de hormigón sometidas a 0.5 MPa de presión hidrostática durante tres días. Las muestras de hormigón se vierten y curan durante 28 días y luego se colocan en el dispositivo de ensayo. Los porta muestras están abiertos por ambos extremos, uno de los cuales está sometido a la presión hidrostática. Al cabo de tres días, las muestras se sacan del aparato de ensayo, se parten por la mitad verticalmente y se mide la profundidad máxima de penetración del agua.

*Dónde es más útil:* Este ensayo determina la verdadera permeabilidad del hormigón mediante la evaluación de la resistencia del hormigón a la penetración del agua bajo presión hidrostática y debería ser el ensayo preferido si el hormigón está sometido a presión hidrostática. Cuanto menor sea la profundidad de penetración, mayor será la resistencia al agua bajo presión hidrostática. Este ensayo es útil para sótanos, túneles y depósitos de agua, ya que recrea de forma realista las condiciones de presión a las que están sometidas estas estructuras.

*Limitaciones:*

- Para mezclas densas y de baja permeabilidad, la profundidad de penetración del agua es baja, lo que dificulta la comparación de mezclas que tienen baja permeabilidad (en estos casos la prueba GB 18445/1 es la adecuada, ó en algunos casos se puede modificar la presión o la edad de ensayo); y
- Para hormigones no sometidos a presión hidrostática, este ensayo debe utilizarse junto con el ensayo de absorción.

## **PRUEBAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA**

### **RESISTIVIDAD ELÉCTRICA-UNE 83988-1**

*Descripción:* El procedimiento según la norma UNE-83988-1, consiste en aplicar una intensidad de corriente alterna (I) de 50 mA con una frecuencia de 500 Hz sobre una de las dos placas de acero inoxidable con esponjas húmedas, colocadas en los extremos del cilindro. Se registra el valor de potencial eléctrico (V) con un multímetro de alta impedancia. Con los valores de I y V se determina la resistividad eléctrica del hormigón por medio de la ley de Ohm y el factor de configuración geométrica del cilindro, como el área (A) entre la longitud (L).

### **RESISTIVIDAD ELÉCTRICA-UNE 83988-2**

*Descripción:* La prueba UNE 83988-2, conocida como la técnica de Wenner (de 4 puntas o electrodos) emplea un equipo resistivímetro. El proceso consiste en aplicar una corriente eléctrica de hasta 40 mA con frecuencia de 500 Hz, entre dos electrodos situados en los extremos y la medición del voltaje a través de otros dos electrodos situados entre los anteriores, los cuales deben estar alineados. Los electrodos son de acero inoxidable de 4 mm de diámetro acoplados en un soporte rígido con una separación de 5 cm. En cada electrodo se coloca una esponja individual humedecida previamente por cada medición. Para este proceso se efectúan 4 mediciones de resistividad en caras paralelas sobre la superficie del cilindro de hormigón, posteriormente se obtiene una resistividad promedio que se registra como la medida de la prueba.

### **RESISTIVIDAD ELÉCTRICA-ASTM C1876**

*Descripción:* La prueba ASTM C1876 mide la conductividad, normalizada con respecto al área de la sección transversal, de la electricidad a través de una muestra de hormigón. La inversa de la conductividad es la resistividad. La resistividad es una prueba de la dificultad que tiene una corriente para llegar de un extremo a otro de la muestra. Esta prueba mide realmente la resistividad eléctrica de la solución de los poros del hormigón. Esto hace que sea útil para estimar el coeficiente de difusión, ya que tanto la resistividad como el coeficiente de difusión son el resultado de la estructura de los poros del hormigón. Las muestras se sumergen en agua saturada de cal para saturar uniformemente los poros con un líquido conocido. Las mediciones en la muestra de 100 × 200 mm pueden comenzar inmediatamente después del desmoldeo y pueden continuar a lo largo del tiempo.

*Donde es más útil:* Las mediciones de resistividad pueden utilizarse para estimar el coeficiente de decaimiento en los modelos de ciclo de vida. También puede utilizarse para estimar el coeficiente de difusión basándose en los datos de correlación entre ASTM C1556 o NT Build 492. Esta prueba es rápida y repetible y puede utilizarse para el control de calidad y el diseño.

*Limitaciones:*

- No encontradas

### **PRUEBA DE AUTOSELLADO GB 18445/1**

*Descripción:* La capacidad de autosellado es el proceso por el cual un hormigón puede auto sellar o auto reparar o auto sanar grietas con un espesor menor a 0.4 mm de manera autónoma. La prueba GB 18445/1 es un método para determinar la capacidad de autosellado en el hormigón mediante la disminución de flujo de agua que pasa por un área agrietada con respecto al tiempo. La prueba consiste en colocar la muestra en el equipo de autosellado a la edad de 28 días. La muestra agrietada se envuelve con una cinta plástica resistente para evitar la fuga de agua y finalmente se cubre con una banda de neopreno, antes de colocarlo en el molde de prueba. Para garantizar que el agua entre y salga por los extremos del cilindro, se colocan empaques de neopreno (o silicon) para sellar el contorno de ambos extremos externos del molde. Finalmente, se aplica agua a una presión entre 0.1 a 0.3 MPa y se mide el flujo inicial de cada muestra. Para ello se mide el tiempo y el peso de agua obtenidos. Para promover el autosellado se debe aplicar diariamente agua a presión, por lo menos dos veces al día, y en cada caso de 10 minutos. Se aplica ocho ciclos, y cada ciclo una duración de una semana, y el flujo de cada celda se cuantifica semanalmente. Los resultados son graficas de flujo versus tiempo (por ciclo) y porcentajes de autosellado versus tiempo (por ciclo).

*Dónde es más útil:* Este ensayo evalúa el desempeño de baja permeabilidad de mezclas de hormigón densas y de baja permeabilidad.

*Limitaciones:*

- No encontradas

### **MÉTODOS DE PRUEBA PARA EVALUAR LA DURABILIDAD DEL HORMIGÓN**

Los diseños de mezcla específicos para el medio ambiente son necesarios para cada condición única, al igual que los métodos de prueba apropiados para el entorno de servicio. Los ensayos de absorción son más adecuados para hormigones con poca o ninguna presión hidrostática y los ensayos de permeabilidad deberían ser el principal ensayo para evaluar el hormigón sometido a presión hidrostática. Las especificaciones para los ensayos de durabilidad del hormigón deben centrarse en la determinación de la permeabilidad, la resistencia a los factores ambientales y la tendencia al agrietamiento del hormigón.

Un diseño de hormigón durable para evaluar y medir parámetros de durabilidad deberá incluir en su especificación la medición la resistencia de penetración de iones cloruro, penetración de agua bajo presión, migración de cloruros, resistividad eléctrica y capacidad de autosellado mediante ensayos normalizados que permitan valorar el desempeño de las mezclas de hormigón diseñados por durabilidad para garantizar la vida útil de una estructura de hormigón. En la siguiente sección se presenta una descripción de las pruebas recomendados para evaluar la durabilidad del hormigón.

- ✓ ASTM C1202: Permeabilidad al ión cloruro
- ✓ BS EN 12390-8: Profundidad de penetración de agua bajo presión
- ✓ NT Build 492: Coeficiente de migración de iones cloruro
- ✓ GB 18445/1: Capacidad de autosellado de grietas no estructurales
- ✓ UNE 83988-1: Prueba de resistividad eléctrica—Método directo
- ✓ UNE 83988-2: Prueba de resistividad eléctrica: Método de las cuatro puntas o de Wenner

## **INDICACIÓN ELÉCTRICA DE LA CAPACIDAD DEL HORMIGÓN PARA RESISTIR LA PENETRACIÓN DE IONES CLORURO-ASTM C1202**

Este ensayo, también conocido como RCPT (Rapid Chloride Permeability Test), determina un índice para caracterizar la penetrabilidad que posee el ion cloruro de un hormigón, mediante un ensayo acelerado de permeabilidad a cloruros mediante la aplicación de un campo eléctrico. El ensayo consiste en posicionar un espécimen previamente condicionado y saturado en agua, de 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor, en una celda que contiene, por un extremo, una reserva con una solución al 3% de NaCl y por otro una reserva con una solución 0.3M NaOH. Se conecta una fuente de poder entre las celdas y se aplica un diferencial de potencial de 60 V DC, en el que la terminal negativa es conectada en la reserva con NaCl y la terminal positiva en la reserva con NaOH. Los iones cloruro migran hacia la terminal positiva, forzados por la diferencia de potencial generada por la fuente (Figura 1). Su resultado depende en gran medida de los componentes del material cementicio, la relación w/mc del hormigón, la condición de las muestras en la prueba (grietas, tamaño, alineación y humedad, principalmente) y la implementación adecuada de la prueba. La cantidad de carga que circula a través de la muestra ensayada se relaciona con la permeabilidad al ión cloruro que posee. Durante seis horas se registra la cantidad de carga eléctrica que pasa, en Coulombs, y el resultado se asocia a la penetrabilidad del ión cloruro en la muestra. (Tabla 1, ASTM C1202).

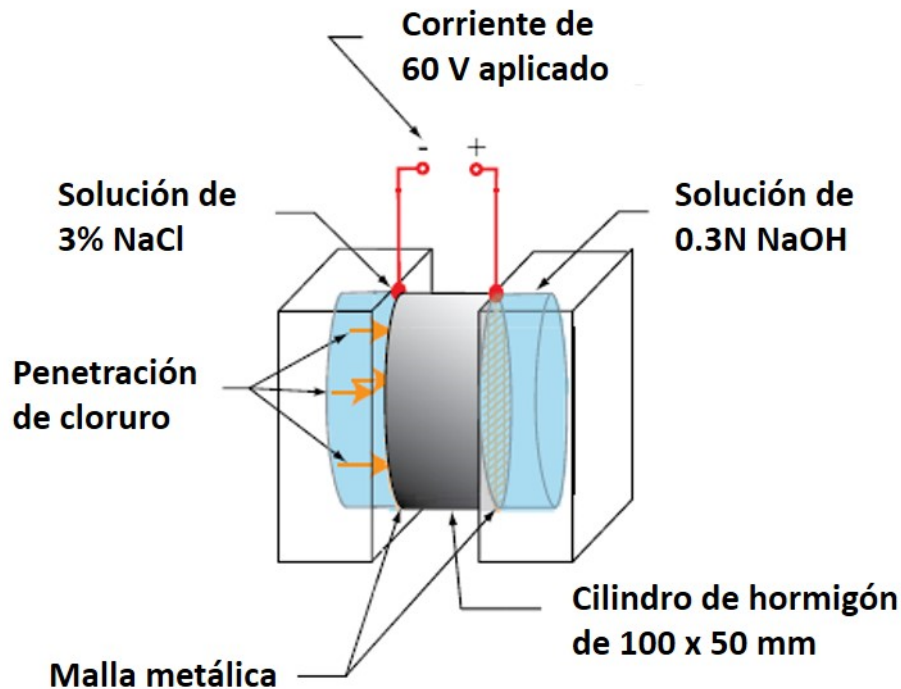


Figura 1. Esquema de la configuración del ensayo ASTM C1202<sup>1</sup>

Carga que pasa (Coulombs)	Penetrabilidad al ión cloruro
> 4,000	Alta
2,000 – 4,000	Moderada
1,000 - 2000	Baja
100 – 1,000	Muy baja
< 100	Despreciable

Tabla 1 - Penetrabilidad de iones cloruro basada en la carga que pasa<sup>2</sup>

## PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN-BS EN 12390-8

Mediante este ensayo se determina la profundidad de penetración del agua bajo una presión hidrostática continua de 72 h de al menos 0.5 MPa (50 m de columna de agua). La Figura 2 muestra un esquema del dispositivo de ensayo. Las probetas son cúbicas y se ensayan a la edad especificada, considerando una condición estándar de laboratorio de curado con agua. En el caso de los hormigones ordinarios, la edad de ensayo es de 28 días, y para los hormigones que contienen materiales cementantes suplementarios, la edad de ensayo puede ser de 56 o 90 días.

Después de desmoldar la probeta la superficie que recibirá la presión del agua, se alisa con un cepillo metálico. Enseguida, se inicia el tiempo de curado con agua hasta de la edad de ensayo especificada. La probeta se coloca entonces en un dispositivo de ensayo proporcionando hermeticidad en los bordes para asegurar la aplicación de la presión del agua sólo en la parte superior. Se aplica una presión de agua controlada sobre la superficie de la muestra durante 72 h de forma continua. Una prueba modificada (DIN 1048 parte 5) considera la repetición de las condiciones mencionadas durante 4 ciclos. Si la muestra tiene signos de filtración en los lados no expuestos al agua, se cuestiona la validez del resultado. Una vez que la probeta ha recibido la presión del agua durante el tiempo y el número de ciclos especificados, se retira del dispositivo de ensayo y se limpia el exceso de agua. Después, se corta la probeta por la mitad para medir la profundidad de penetración del agua.

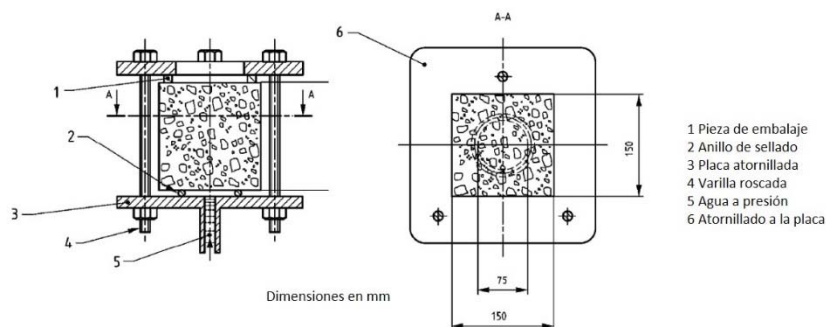


Figura 2. Esquema del dispositivo del ensayo BS EN 12390-8<sup>3</sup>

## COEFICIENTE DE MIGRACIÓN DE IONES CLORURO-NT BUILD 492

El método NT BUILD 492 permite determinar el coeficiente de migración de iones cloruro no estacionario. Es decir, se induce una corriente eléctrica para promover la entrada de iones de cloruro en el hormigón. Esta prueba refleja la capacidad del hormigón para resistir la entrada de cloruro y otros iones nocivos en su matriz, lo que tiene que ver con las características de permeabilidad y porosidad. Las muestras corresponden a cilindros de 100 mm de diámetro y 50 mm de altura, que se acondicionan de forma similar a los requisitos de la norma ASTM C1202. El periodo de exposición consiste en la inmersión de una solución de cloruro de sodio y otra de hidróxido de sodio. Dura de 24 a 96 h. La prueba se desarrolla a 30 V registrando la corriente. Una vez finalizado el ensayo, la muestra se corta por la mitad y se rocía tópicamente con nitrato de plata. Se forma una película blanca de nitrato de plata en presencia de iones de cloruro. La profundidad de penetración del cloruro se mide como la media de siete mediciones realizadas en el ancho de la muestra. El coeficiente de migración se calcula con la expresión propuesta por la NT BUILD 492, a partir de las profundidades de penetración de los iones cloruro, el ancho de la muestra, el tiempo de exposición, la tensión y la temperatura media. La clasificación de la resistencia a la penetración de los iones de cloruro según este método de ensayo se presenta en la Tabla 2.

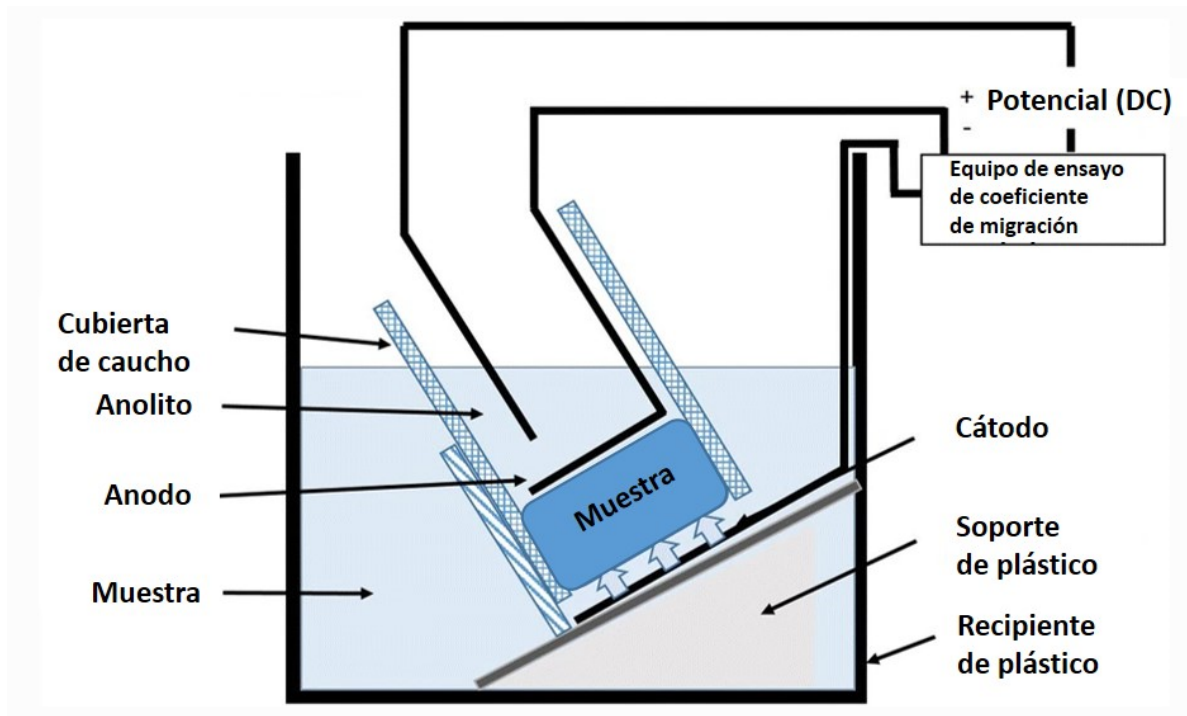


Figura 3. Disposición del montaje del ensayo NT BUILD 492<sup>4</sup>

Coefficiente de difusión	Resistencia a penetración de cloruro
$< 2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Muy buena
$2 - 8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Buena
$8 - 16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Aceptable
$> 16 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Inaceptable

Tabla 2- Clasificación de la resistencia a la entrada de iones cloruro<sup>5</sup>

### CAPACIDAD DE AUTOSELLADO DE GRIETAS NO ESTRUCTURALES-GB 18445/1

El objetivo de este método de ensayo es determinar la capacidad del hormigón para autosellar grietas de hasta 0.4 mm de abertura durante el periodo de ensayo. El flujo de agua, que pasa a través de una probeta agrietada, se determina durante ciclos de 8 semanas de agua inyectada con una presión en el rango de 0.1-1.5 MPa (10-153 m de columna de agua). La capacidad del hormigón para autosellar las grietas se determina como la disminución del flujo de agua por una reacción autónoma.

Se emplean cilindros de 75 mm de diámetro × 150 mm de altura, que se fabrican y curan de acuerdo con la ASTM C192. Una vez desmoldados, los cilindros se

sumergen en agua en condiciones estándar de laboratorio ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$ , ASTM C31) durante  $4 \pm 2$  días en espera del procedimiento de fisuración. La grieta se induce mediante un dispositivo que se instala en una prensa. La velocidad de carga aplicada para producir la grieta controlada es una función de la resistencia del hormigón. La grieta se considera adecuada si el cilindro muestra la grieta en ambos lados de la forma más continua posible. Tras la inducción de la grieta, la probeta debe permanecer unida. A continuación, los cilindros se curan con agua en condiciones estándar de laboratorio hasta alcanzar la edad de ensayo. Para los hormigones ordinarios, el tiempo de ensayo es de 28 días, y para los hormigones con materiales cementicios suplementarios, el tiempo de ensayo puede ser de 56 o 91 días para que se produzcan las reacciones puzolánicas.

Para el procedimiento de presión de agua, los cilindros se sellan con una película de plástico, por una funda de neopreno y selladas con silicona para permitir únicamente el flujo de agua desde su superficie superior a la inferior. A continuación, los cilindros ya preparados se colocan dentro del molde de acero en el dispositivo de presión de agua. La presión de agua aplicada a los cilindros es una función de la apertura de la grieta para permitir una medición precisa de la cantidad de agua. La presión de agua se mantiene durante todo el ensayo. Se aplica automáticamente dos veces al día con una duración de 10 minutos en cada aplicación durante 8 semanas (ciclos) en un dispositivo de ensayo. El flujo de agua se mide por cilindro cada semana, proporcionando un flujo de agua por cada ciclo y un porcentaje de autosellado de grietas frente a las curvas del ciclo. La figura 4 muestra el procedimiento del ensayo.



*Figura 4. Esquema de la configuración del ensayo GB 18445/1*

## PRUEBA DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA – UNE 83988-1 Y UNE 83988-2

El ensayo de resistividad eléctrica se puede realizar mediante unos electrodos colocados en las caras paralelas de las probetas o usando el método de las 4 puntas. Ambos métodos están regulados por las normas UNE 83988-1 y UNE 83988-2, y proporcionan una indicación del nivel de corrosión de la armadura de acero o de su riesgo de aparición. La resistividad eléctrica es una función del tipo de exposición, tamaño de la muestra, porosidad, permeabilidad las condiciones del ambiente y el grado de carbonatación, principalmente.

**El método UNE 83988-1** consiste en aplicar un campo eléctrico uniforme mediante dos electrodos en contacto con las bases de la probeta. Las muestras son cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, y se fabrican de acuerdo con la ASTM C192. Los cilindros no deben incluir barras de acero ni fibras, las bases deben ser perfectamente planas y paralelas. Se sumergen en agua hasta la edad de ensayo. Para el ensayo se utiliza un aparato para inducir una intensidad de corriente sobre el cilindro aportando también una medición de la intensidad y el potencial. Se hace circular una corriente alterna de 500 mA con una frecuencia inferior a 500 Hz. El montaje de la prueba se muestra en la figura 5 y la tabla 3 muestra la calificación de riesgo de ocurrencia de corrosión.

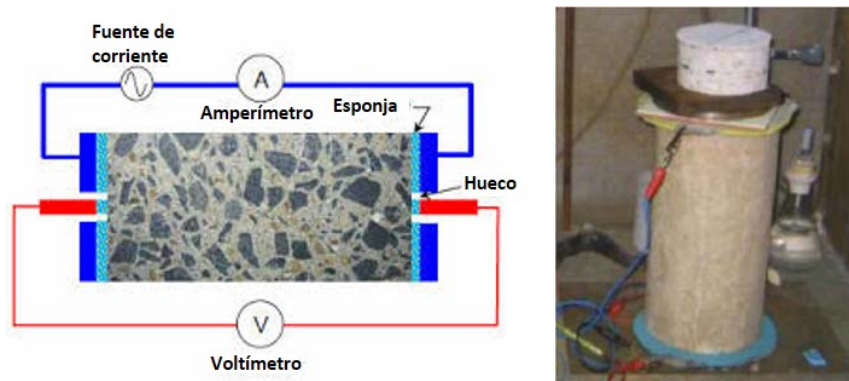


Figura 5. Esquema de la configuración del ensayo UNE 83988-1<sup>6,7</sup>

Resistividad	Riesgo de ocurrencia de corrosión
> 100 a 200 kΩ cm	Muy baja
50 a 100 kΩ cm	Baja
10 a 50 kΩ cm	Moderada
< 10 kΩ cm	Alta

Tabla 3 - Criterio de evaluación de resistividad eléctrica<sup>8</sup>

Los electrodos a utilizar serán dos mallas de acero tupidas o chapas de acero, cobre o cualquier otro metal conductor que tendrán que tener las dimensiones de las bases del cilindro. Se utilizarán también dos esponjas finas de dimensión igual que la de los electrodos y que se colocarán entre las chapas o mallas y las bases de la probeta. Éstas deberán ser humedecidas para realizar el ensayo.

**El método UNE 83988-2** consiste en la aplicación de una corriente entre dos electrodos situados en la generatriz del cilindro, y medir el voltaje en otros dos electrodos situados entre los anteriores y alineados con ellos. Proporciona la resistencia eléctrica del hormigón conociendo la distancia entre los electrodos y las dimensiones del cilindro. Las probetas a utilizar se fabrican siguiendo las mismas consideraciones y especificaciones requeridas para las muestras del método UNE 83988-1 No podrán contener ninguna armadura en su interior y deberán ser cilíndricas con una altura mínima de 200 mm. Al igual que en el ensayo UNE 83988-1 deberán estar saturadas previamente. Para la medición se utiliza un medidor de resistencia eléctrica de cuatro puntas o tipo Wener. Éste inducirá al cilindro una corriente alterna de 40 mA con una frecuencia inferior a 500 Hz. La figura 6 muestra un esquema de la configuración del ensayo.



*Figura 6. Esquema de la configuración del ensayo UNE 83988-2<sup>9, 7</sup>*

Los electrodos serán cuatro puntas de cobre u otro conductor de metal de diámetro entre 4 y 6 mm acoplados en un soporte rígido con una separación de 5 cm. Cada electrodo contará con una esponja individual humedecida previamente.

## CONCLUSIONES

El estudio y evaluación de la durabilidad de las estructuras de hormigón es un tema de interés actual. El deterioro del hormigón debido a la presencia de agentes externos y condiciones de exposición en variados ambientes es evidente que reduce el tiempo de vida útil para el cual fueron diseñadas las estructuras. Por ello, es necesario atender este requerimiento evaluando los parámetros relacionados con la durabilidad. Un paso importante para atender esta necesidad es contar con un laboratorio que facilite la realización de las pruebas requeridas.

Para la evaluación de las prestaciones relacionadas con la durabilidad de los hormigones se utilizan diferentes metodologías. La investigación sobre la durabilidad del hormigón ha sido muy activa, principalmente asociada a la medición de la permeabilidad al agua e iones cloruro y su paso a través de las grietas. Hay una gran variedad de métodos de pruebas para evaluar estas propiedades.

En este artículo, se presentó una revisión de los principales métodos de prueba para evaluar los parámetros de durabilidad del hormigón y se destacó la recomendación de las metodologías principales. La selección del método de prueba para evaluar la durabilidad de una estructura de hormigón dependerá de la condición de exposición considerada, la intención de los métodos de prueba es reproducir las condiciones de vida útil de la estructura. Para concluir, para cada condición única del medio ambiente es necesario un diseño de mezcla de hormigón específico, al igual que los métodos de prueba apropiados para el entorno de servicio. Los ensayos de absorción son más adecuados para hormigones con poca o ninguna presión hidrostática y los ensayos de permeabilidad deberían ser el principal ensayo para evaluar el hormigón sometido a presión hidrostática. Las especificaciones para los ensayos de durabilidad del hormigón deben centrarse en la determinación de la permeabilidad, la resistencia a los factores ambientales y la tendencia al agrietamiento del hormigón.

## Referencias

1. Ryan, Eric William, "Comparison of Two Methods for the Assessment of Chloride Ion Penetration in Concrete: A Field Study. " Master's Thesis, University of Tennessee, 2011. [https://trace.tennessee.edu/utk\\_gradthes/1017](https://trace.tennessee.edu/utk_gradthes/1017)
2. ASTM C1202 – 19 Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration
3. BS EN 12390-8-2019 British Standard. Testing hardened concrete – Part 8: Depth of penetration of water under pressure
4. Kim, TK., Choi, SJ., Choi, JH. *et al.* Prediction of Chloride Penetration Depth Rate and Diffusion Coefficient Rate of Concrete from Curing Condition Variations due to Climate Change Effect. *Int J Concr Struct Mater* **13**, 15 (2019). <https://doi.org/10.1186/s40069-019-0333-4>
5. Teresa Zych (2014). Test methods of concrete resistance to chloride ingress. Technical Transactions. Civil Engineering Issue 6-B (21), pp 117-139. <https://doi.org/10.4467/2353737XCT.14.385.3696>
6. German Instruments. Merlin. <https://www.germanninstruments.com/>
7. Andrade C. & Andrea R. D. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista ALCONPAT*, 1 (2), 90 - 98. <https://doi.org/10.21041/ra.v1i2.8>
8. Hintamai S. (2005). Lightning surge impedance of concrete pole due to the effect of electrical properties of concrete. PhD Thesis. Kasetsart University. ISBN 974-9837-97-5
9. Andrade C. (2018). Design and evaluation of service life through concrete electrical resistivity. *Revista ALCONPAT*, 1 (2), 264 - 279. <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.349>