

6

Métodos Eléctricos Para Evaluar Resistencia A Cloruros En Hormigones En Ambiente Marino: Estado Del Arte

Electrical Methods for assessment Chloride Resistance of Concrete in Marine Environments: A State-of-the-Art Review

Autores

Yamilet Colmenero Salas

Ing. Civil , Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría"

colmenerosalasyamilet@gmail.com

[httpSP ://orcid.org/0009-0002-2006-9470](http://orcid.org/0009-0002-2006-9470)

Alejandro Fernández Domínguez

Ing. Civil , Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría"

afernandezd@civil.cujae.edu.cu

[httpSP ://orcid.org/0000-0001-5792-3031](http://orcid.org/0000-0001-5792-3031)



Nota Editorial: Recibido: 25 de mayo 2026 Aceptado: 30 de junio 2026

6

Métodos Eléctricos Para Evaluar Resistencia A Cloruros En Hormigones En Ambiente Marino: Estado Del Arte

Resumen

La durabilidad de las estructuras de hormigón armado en ambientes marinos representa uno de los desafíos más críticos en la ingeniería civil moderna. El ingreso de iones cloruro constituye la principal amenaza para la integridad del acero de refuerzo, desencadenando procesos de corrosión que comprometen la seguridad estructural. En este contexto, los métodos eléctricos se han consolidado como herramientas fundamentales para evaluar la resistencia del hormigón al transporte de cloruros, ofreciendo ventajas significativas en rapidez y aplicabilidad práctica. Este artículo presenta un estado del arte sobre estas técnicas, incluyendo los ensayos de migración acelerada y las mediciones instantáneas de resistividad o conductividad eléctrica. Asimismo, se analiza la fundamentación teórica basada en las ecuaciones de Nernst-Planck y Nernst-Einstein, y su relación con la microestructura del hormigón. Finalmente, se discuten las limitaciones de cada método y las correlaciones existentes entre los ensayos acelerados y la difusión natural.

Palabras Clave

ambientes marinos, ingreso de cloruros, métodos eléctricos, migración iónica, resistividad eléctrica.

6

Electrical Methods for assessment Chloride Resistance of Concrete in Marine Environments: A State-of-the-Art Review

Abstract

The durability of reinforced concrete structures in marine environments represents one of the most critical challenges in modern civil engineering. The ingress of chloride ions constitutes the primary threat to the integrity of the reinforcing steel, triggering corrosion processes that compromise structural safety. In this context, electrical methods have become established as essential tools for assessing the resistance of concrete to chloride transport, offering significant advantages in terms of speed and practical applicability. This paper presents a state-of-the-art review of these techniques, including accelerated migration tests—such as the Rapid Chloride Permeability Test (RCPT)—and instantaneous measurements of electrical resistivity or conductivity. Furthermore, it examines the theoretical foundation based on the Nernst-Planck and Nernst-Einstein equations, as well as their relationship with the concrete microstructure. Finally, the limitations of each method and the existing correlations between accelerated tests and natural diffusion are discussed.

Keywords

marine environments, chloride ingress, electrical methods, ionic migration, electrical resistivity.

1. INTRODUCCIÓN

La industria de la construcción enfrenta el desafío fundamental de garantizar la durabilidad de las estructuras de hormigón armado [1,2]. En estructuras expuestas a ambientes marinos, la corrosión del acero de refuerzo representa la causa principal de deterioro prematuro —con elevados costos de reparación y mantenimiento, siendo el ingreso de iones cloruro a través de la red de poros parcial o completamente saturadas del hormigón, el mecanismo desencadenante que compromete gravemente su durabilidad estructural [3-5].

El modelo de vida útil propuesto por Tuutti [6] distingue dos fases críticas para predecir la durabilidad de estructuras de hormigón armado frente a la corrosión inducida por cloruros: la fase de iniciación, durante la cual los agentes agresivos penetran hasta alcanzar el acero de refuerzo a través de la microestructura caracterizada por la complejidad de la red de poros (volumen de poros conectados y tortuosidad), y la fase de propagación, caracterizada por la corrosión progresiva del acero que genera fisuras y eventual colapso estructural. En ausencia de iones de cloruro, el acero permanece protegido en el ambiente altamente alcalino del hormigón gracias a la formación espontánea de una capa de pasivación. Esta capa consiste en una película delgada y adherente de óxidos estables (principalmente Fe_3O_4 y Fe_2O_3) que actúa como barrera contra la oxidación. El fenómeno de despasivación se desencadena cuando la concentración de cloruros en la interfaz hormigón-acero supera un umbral crítico (típicamente de 0,4 a 1% respecto al peso de cemento), momento en que se destruye dicha capa y se inicia la corrosión electroquímica. Esto genera productos de corrosión expansivos ($\text{Fe}(\text{OH})_2 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_3$) que aumentan su volumen hasta 6-7 veces, agrietando el recubrimiento de hormigón [7,8].

El transporte de iones cloruro en la fase de iniciación es un proceso complejo que involucra múltiples mecanismos, como la difusión (flujo producido por gradiente de concentración), la succión capilar (producido por fuerzas capilares en los poros) y la convección (flujo inducido por gradiente de presión hidráulica). Estos mecanismos ocurren bajo condiciones externas variables de humedad relativa, ciclos de mojado-secado, gradientes térmicos y niveles de saturación del hormigón. Además, estos modifican continuamente la estructura porosa -volumen de poros, diámetro máximo de poro y conectividad- y, en consecuencia, la velocidad y profundidad de penetración de los cloruros [9-11].

En las estructuras expuestas a ambientes marinos —tanto sumergidas, como en aéreas—, la difusión predomina como vía principal de penetración de cloruros, por lo que el coeficiente de difusión (D) se utiliza para cuantificar la resistencia al transporte iónico, definiéndose como el flujo por unidad de gradiente de concentración. Este comportamiento se evalúa habitualmente en tiempo real mediante perfiles de cloruro obtenidos en estructuras in-situ —concentración de cloruro en la profundidad—, lo que permite ajustar el coeficiente de difusión a condiciones de servicio reales y mejorar la predicción de vida útil frente a la corrosión. El coeficiente de difusión de cloruros también se modela experimentalmente mediante pruebas de difusión natural (inmersión y celdas de difusión), que simulan fielmente las condiciones reales de servicio, pero requieren períodos prolongados (días o meses), limitando su aplicabilidad práctica [3,4,12,13].

Para superar esta limitación, se han desarrollado métodos eléctricos acelerados (ME): las pruebas de migración (estacionarias y no estacionarias) y las mediciones de conductividad o resistividad eléctrica. Las primeras aplican un campo eléctrico externo para forzar el movimiento direccional de iones cloruro a través de la matriz porosa del hormigón, permitiendo calcular coeficientes de migración (D_{mig}) que cuantifican la velocidad de penetración iónica bajo tensión. Las segundas evalúan la propiedad intrínseca del hormigón para resistir el paso de corriente (medida en $\text{k}\Omega\cdot\text{cm}$), actuando como un indicador global de la microestructura porosa y su potencial de transporte de iones sin aplicar migración forzada. Mientras que las pruebas de migración simulan de forma acelerada la fase de iniciación por cloruros en condiciones controladas, las mediciones de resistividad proveen un diagnóstico rápido y no destructivo de la durabilidad general. Estos métodos reducen significativamente el tiempo de ensayo a horas o días. Sin embargo, su interpretación presenta desafíos debido a los efectos del campo eléctrico aplicado, lo cual genera discrepancias significativas: los coeficientes medidos por migración no estacionaria pueden ser hasta diez veces mayores que los de migración estacionaria. Esto obliga a utilizar factores de correlación empíricos para relacionarlos con las condiciones de difusión natural en servicio [14,12,13].

Los ME se basan en los principios electroquímicos del transporte iónico a través de la estructura porosa del hormigón, de modo que reflejan la respuesta global del material frente al movimiento de especies cargadas dentro de su microestructura. La influencia de estos métodos sobre la difusión no está determinada únicamente por la tortuosidad y conectividad de la red de poros, sino también por la composición química de la solución de poros (SP), que es el medio a través del cual se conduce la electricidad [15].

La SP corresponde a la fase líquida contenida en la red porosa interconectada de la pasta de cemento hidratada: inicialmente es el agua de amasado, que se transforma rápidamente en una solución concentrada de álcalis y sulfatos, y durante el fraguado evoluciona desde un fluido continuo a una fase líquida discontinua pero aún interconectada, a través de la cual progresa la hidratación. Esta fase es un electrolito cuya composición depende del grado de hidratación, la temperatura, la relación agua/material cementante (a/mc) y la presencia de materiales cementantes suplementarios, con implicaciones directas en las propiedades de transporte del hormigón [15].

La validez y capacidad interpretativa de los ME dependen de forma crítica de la comprensión de estas relaciones entre la conductividad eléctrica del hormigón, la composición y movilidad iónica de la SP y los coeficientes de difusión de cloruros, relaciones que se formulan rigurosamente mediante las ecuaciones de Nernst-Planck y Nernst-Einstein, las cuales vinculan el flujo de iones cloruro con el gradiente de concentración, el campo eléctrico aplicado y las propiedades de la SP, permitiendo establecer correlaciones teóricas entre los parámetros eléctricos medidos experimentalmente y los coeficientes de difusión [3,10,16-18].

Para comprender adecuadamente cómo estos cambios microestructurales se traducen en parámetros medibles y en la respuesta de los métodos eléctricos, resulta imprescindible revisar los fundamentos teóricos del transporte iónico [19,7,11].

2. EL TRANSPORTE IÓNICO EN LA MICROESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

La comprensión cuantitativa de este fenómeno requiere modelos matemáticos que describan los mecanismos de transporte iónico en medios porosos complejos. Las ecuaciones presentadas en este documento constituyen el marco teórico fundamental para: (i) caracterizar el transporte de cloruros mediante migración; (ii) relacionar propiedades eléctricas medibles con coeficientes de difusión; y (iii) cuantificar el efecto de la microestructura del hormigón sobre el transporte iónico.

El transporte de iones cloruro a través de la estructura porosa del hormigón saturado no ocurre de forma aislada, sino acoplado al movimiento de otras especies iónicas presentes en la SP (Cl^- , OH^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , etc.). Para describir matemáticamente este complejo transporte multiiónico y las interacciones electrostáticas, es indispensable plantear primero dos restricciones fundamentales que rigen el sistema: la condición de conservación de masa y la condición de electroneutralidad.

La condición de conservación de masa para cada especie iónica i se expresa a través de la ecuación de continuidad (ecuación 1) [8,9,20-22] :

$$\frac{\partial C_i}{\partial x} + \nabla \cdot J_i = R_i \quad (1)$$

Esta ecuación establece que el cambio temporal de la concentración (C) del ion (i) en un punto (x), sumado al flujo neto (ΔJ_i) de ese volumen de control, debe ser igual a las reacciones químicas (R_i), como la fijación física o química para el ion cloruro en las superficies de los productos de hidratación del cemento o su precipitación.

De manera complementaria, la condición de electroneutralidad (ecuación 2) [23,20,15,24,25], establece que la suma de las cargas de todas las especies iónicas disueltas en la SP debe ser igual a cero:

$$\sum_i z_i \times C_i = 0 \quad (2)$$

Es bajo el cumplimiento estricto de estas dos condiciones que se plantea la ecuación de Nernst-Planck (ecuación (3)) [3,9,10,23,20,7], empleada para modelar el transporte de iones cloruro a través de la estructura porosa del hormigón saturado. En esta formulación, J_i ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) representa el flujo molar de una especie iónica i en la dirección espacial x , mientras que D_i corresponde al coeficiente de difusión de dicha especie en el medio poroso ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). Asimismo, x denota la coordenada espacial (m), z_i es la valencia de la especie iónica, F la constante de Faraday ($96,485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$), R la constante universal de los gases ($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$), T la temperatura absoluta (K), E el potencial eléctrico (V), y v la velocidad de convección de la SP ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

$$J_i = -D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} - \frac{z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial E}{\partial x} + C_i v \quad (3)$$

La ecuación (3) describe el flujo total de la especie iónica como la suma de tres contribuciones fundamentales: (i) la difusión debida al gradiente de concentración (primer término, figura 1a), (ii) la migración inducida por un campo eléctrico (segundo término, figura 1b), y (iii) la convección asociada al movimiento del fluido en los poros (tercer término). En este contexto, C_i es la concentración molar de la especie i ($\text{mol} \cdot \text{m}^{-3}$), y ∂C_i representa su variación temporal o acumulación.

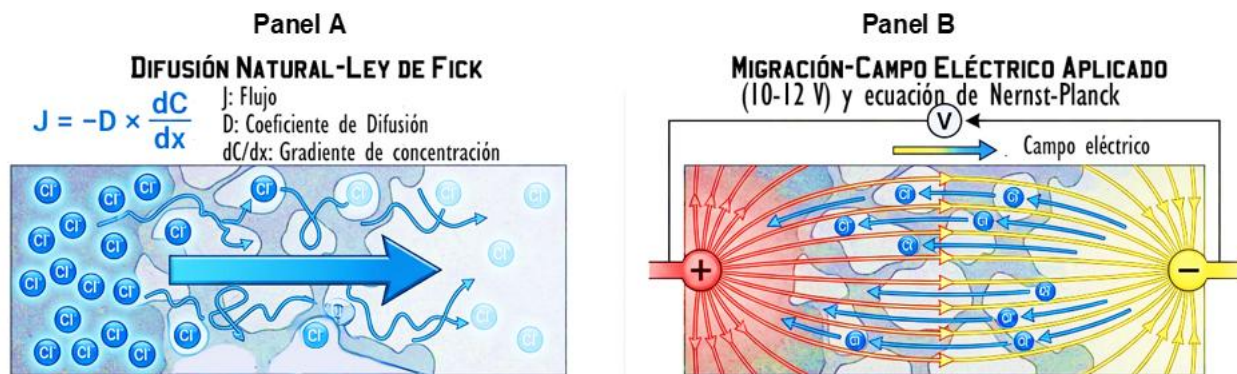


Fig. 1 - Esquema elaborado por el autor, adaptado a partir de conceptos de transporte iónico en medios porosos descritos en [23,20,13,12]. Imagen generada con IA.

El transporte iónico a través de la SP del hormigón, descrito por la ecuación de Nernst-Planck, depende de las características geométricas de la red de poros y de las interacciones físico-químicas que ocurren en la SP y en la superficie sólida de la matriz cementicia (Figura 2).

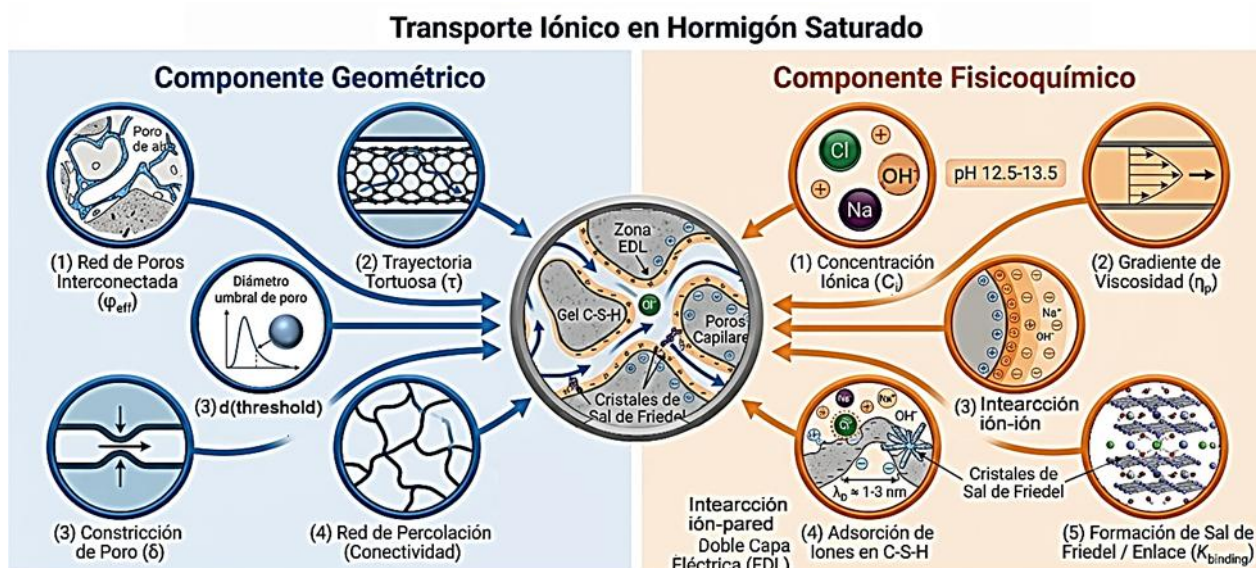


Fig. 2 - Esquema elaborado por el autor, adaptado a partir de conceptos de microestructura en medios porosos. Imagen generada con inteligencia artificial Zebrafish Recirculation Quarantine System, 2025.

Las características microestructurales y fisicoquímicas del hormigón que influyen conjuntamente en el transporte iónico se integran en un componente geométrico y un componente fisicoquímico [26,27]. El componente geométrico, que gobierna principalmente el flujo en estado estacionario, está condicionado por características como: (i) la porosidad efectiva (ϕ_{eff}), definida como la fracción volumétrica de poros conectados que participan en el transporte iónico [28]; (ii) la tortuosidad (τ), entendida como la relación entre la longitud efectiva del camino iónico y la distancia en línea recta [29,30]; (iii) la conectividad capilar, definida como el grado en que los poros forman una red continua que permite el transporte iónico a través del material [31,32]; (iv) el diámetro umbral del poro ($d_{threshold}$), entendido como el diámetro crítico de las gargantas de poro, en las cuales ocurren constricciones (δ) que regulan el acceso a la red capilar conectada. [33-35].

Por su parte, el componente fisicoquímico agrupa factores como: (i) la concentración iónica y actividad de las especies Cl^- , las interacciones electrostáticas entre las mismas que reducen la migración libre [25,24]; (ii) la viscosidad de la SP (η_p), que representa la resistencia interna del líquido al flujo [36,37]; (iii) la doble capa eléctrica (EDL) [38-41], que genera campos electrostáticos en las superficies cargadas del C-S-H que favorecen la adsorción física de cloruro; y (iv) la capacidad de fijación química, mediante la formación de sal de Friedel $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCl_2 \cdot 10H_2O$ y otras fases cloroaluminato, como el monocarboaluminato clorado, originadas por la reacción con C3A y fases AFm [42,43].

Dos regímenes fundamentales caracterizan la dinámica del transporte iónico en la SP del hormigón: el no estacionario y el estacionario. En el régimen no estacionario, el coeficiente de difusión, denominado no estacionario (D_{ns}) o aparente (D_a), domina la fase inicial donde ocurren los mecanismos de reacción y adsorción previamente descritos —fijación química de cloruros en fases aluminicas y su retención física en la red de poros—, lo que provoca que la concentración del ion Cl^- libre disminuya y el coeficiente varíe con el tiempo[44]. En el régimen estacionario, una vez agotados estos mecanismos, continúan determinando el transporte las características geométricas de la red capilar con las propiedades de la solución porosa, el flujo se estabiliza y el coeficiente de difusión, denominado efectivo en este régimen de estado estacionario (D_s) o efectivo (D_{eff}), permanece constante [45].

3.MIGRACIÓN IÓNICA ACELERADA POR CAMPO ELÉCTRICO

Entre las técnicas más utilizadas recientemente en laboratorio destaca la aplicación de campos eléctricos para acelerar el transporte iónico y reducir el tiempo de duración de los ensayos, fenómeno conocido como migración iónica. En estas pruebas, típicamente se usa una celda de migración con compartimentos aguas arriba (donde se introduce la solución con cloruros y el ánodo), la muestra de hormigón por donde migran los cloruros, y aguas abajo (con el cátodo y electrodo de medición), donde se detecta el flujo de Cl^- que atraviesa la muestra. El cálculo riguroso de este proceso resulta difícil aplicarlo al hormigón debido a su naturaleza polielectrolítica y alta fuerza iónica; sin embargo, los valores aproximados obtenidos en soluciones homogéneas, binarias y diluidas pueden ser útiles para fines prácticos. Así, mediante ciertas suposiciones y aceptando las correspondientes incertidumbres, la ecuación de Nernst-Planck (ecuación 1) puede emplearse bajo condiciones controladas que anulan los términos que tienen en cuenta tanto la difusión como la convección —es decir, (i) ausencia de gradiente de concentración por saturación uniforme del cloruro y (ii) ausencia de gradiente de presión hidráulica que elimine el flujo convectivo—. En estas condiciones, la ecuación de Nernst-Planck se simplifica según la forma expresada en la ecuación (4) [7,12,44,46,14], considerando el gradiente eléctrico local continuo.

$$J_i = -\frac{z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial E}{\partial x} \quad (4)$$

La aplicación de la ecuación (4) requiere alcanzar un flujo estacionario —detectado experimentalmente por un aumento lineal de Cl^- en el electrodo aguas abajo—; de no cumplirse esta condición, para su solución deben incorporarse derivadas parciales de segundo orden —análogas a las de la segunda Ley de Fick— para describir la variación temporal del flujo. En condiciones estacionarias, la ecuación (4) se simplifica a la ecuación (5) [7,12,46-48], asumiendo un campo eléctrico uniforme (E/l). Esta formulación define el coeficiente de difusión efectiva de cloruros ($D_{eff,Cl}$) en función de la concentración de cloruros (CCl).

$$-D_{eff,Cl} = \frac{J_{Cl} R T l}{z_{Cl} F C_{Cl} E} \quad (5)$$

La medición directa del flujo de cloruros (J_{Cl}) mediante electrodos selectivos de iones presenta varias desventajas significativas que limitan su aplicación práctica en ensayos de hormigón [44]: (i) requiere equipo especializado y costoso, además de un mantenimiento intensivo; (ii) es altamente sensible a interferencias de pH, temperatura y aniones competidores como OH^- , y en menor medida otros como SO_4^{2-} , CO_3^{2-} o NO_3^- presentes en la SP alcalina; (iii) exhibe un tiempo de respuesta lento con retardo en la estabilización de la señal; (iv) posee un rango de medición limitado con baja precisión en concentraciones extremas de Cl^- ; y (v) sufre deterioro prematuro de la membrana selectiva en los ambientes altamente alcalinos propios del hormigón.

Como la corriente eléctrica se transporta a través de los iones, es posible, al medir la corriente transmitida, estimar la cantidad de iones en movimiento y establecer una relación entre corriente y difusividad. El flujo iónico J puede calcularse directamente mediante la ecuación (6):

$$J_i = \frac{I t_i}{z_i F A} \quad (6)$$

Donde, el número de transferencia t_i de una especie i se define como la fracción de la corriente total (I) transportada por dicho ion (I_i). Esto resulta equivalente a la razón entre la conductividad parcial de la especie (σ_i) y la conductividad total de la SP (σ_p) como se muestra en la ecuación (7) [7,12,44,46,15]. La σ_p será abordada en el epígrafe 4.

$$t_i = \frac{I_i}{I} = \frac{\sigma_i}{\sigma_p} = \frac{z_i^2 C_i \lambda_i}{\sum_i z_i^2 C_i \lambda_i} \quad (7)$$

En el caso del ion cloruro, el número de transferencia (t_{Cl}) no es constante, ya que depende de la composición de la SP y la movilidad relativa de especies como OH^- , Na^+ y K^+ [49]. En la práctica, se determina experimentalmente con soluciones electrolíticas sintéticas representativas de la SP o se adoptan valores típicos de literatura.

Andrade en su estudio sobre el tema [50] demuestra que el flujo real de iones en la SP del hormigón depende no solo del gradiente de concentración simple, sino también del gradiente de actividad química de las especies (γ). En el hormigón, la SP presenta una mezcla compleja de cationes (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) y aniones (Cl^- , SO_4^{2-} , OH^-), con alta fuerza iónica y fuertes interacciones electrostáticas entre iones de carga opuesta (formación de pares iónicos, asociaciones, etc.). Esto provoca que la actividad, y no solo la concentración, controle el potencial químico efectivo de cada ion, de modo que el gradiente de actividad —más que el gradiente de concentración— rige el flujo iónico real en procesos de difusión y migración.

Finalmente el $D_{eff,cl}$ en ensayos de migración a partir de mediciones de corriente, se puede determinar mediante la ecuación (8) [7,12,15,44,46] donde la relación $RT/z_{cl}^2 F^2$ se denomina factor termodinámico Nernst-Einstein y L/A la relación geométrica del ensayo.

$$D_{eff,cl} = \frac{R T}{z_{cl}^2 F^2} \frac{t_{cl}}{E} \frac{I}{A} \frac{L}{\gamma C_{cl}} \quad (8)$$

Una simplificación adicional que puede realizarse en la ecuación (8) es expresarla en términos de conductividad (σ) o resistividad (ρ), ya que, según la ley de Ohm (ecuación (9)) [17,16,18,51-53], la densidad de corriente es proporcional al gradiente de potencial eléctrico.

$$\sigma = \frac{L}{E} \times \frac{I}{A} \quad (9)$$

Esta simplificación se formaliza en la ecuación (10) conocida como la relación de Nernst-Einstein (RNE), que conecta el coeficiente de difusión efectivo de un ion con su conductividad iónica individual. Esta relación es válida en soluciones diluidas ideales en equilibrio termodinámico. En términos de resistividad eléctrica ($\rho = 1/\sigma$).

$$D_{eff,cl} = \frac{R T}{z_{cl}^2 F^2} \times \frac{\sigma t_{cl}}{\gamma_{cl} C_{cl}} \quad (10)$$

4. CARACTERIZACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD A TRAVÉS DEL FACTOR DE FORMACIÓN

A partir de esta relación entre difusividad y conductividad, se ha empleado otro método eléctrico no invasivo: las mediciones instantáneas de conductividad o resistividad (MICR) en sólidos porosos saturados con soluciones electrolíticas. Este enfoque, adaptado a sistemas cementicios, utiliza el concepto de F (F) —calculado como la relación entre la resistividad de la solución saturante y la del medio poroso— para estimar la difusividad efectiva del hormigón de manera rápida y práctica.

En el caso de los ensayos eléctricos de migración acelerada generan simultáneamente un gradiente de concentración de NaCl y un gradiente de potencial eléctrico aplicado (por encima de ~10 V), de modo que el transporte iónico se describe mediante la ecuación de Nernst-Planck (relacionando D con mediciones de J) y la RNE (relacionando D con mediciones de I , σ y ρ). Bajo estas condiciones, el flujo queda dominado por la migración, permitiendo estimar coeficientes de difusión.

En contraste, las MICR en condiciones de saturación —sin gradiente salino externo— aplican un potencial eléctrico de menor magnitud, por lo que no reproducen plenamente las condiciones de migración acelerada ni cumplen estrictamente las hipótesis de Nernst-Planck/Nernst-Einstein. Aquí se propone usar el F como aproximación para estimar D a partir de σ o ρ , evitando dificultades experimentales asociadas a cambios químicos y limitaciones instrumentales, especialmente en sistemas cementicios viscosos con concentraciones de iones de 0.5–1.0 mol·kg⁻¹.

G. E. Archie fue quien formuló por primera vez el F como la relación entre la resistividad de una roca saturada y la resistividad del agua que ocupa sus poros —o su equivalente en conductividad, como se expresa en la ecuación (11)— en su trabajo clásico de la década de 1940, conocido como la ley de Archie. [54].

$$F = \frac{\sigma_p}{\sigma} \quad (11)$$

En las MICR, los valores dependen tanto de las conductividades inherentes de las especies iónicas como de la rapidez con que la corriente circula por la red porosa (limitada por tortuosidad, conectividad y complejidad geométrica). Esta restricción —única diferencia entre σ_p y σ — caracteriza cuantitativamente la microestructura mediante F . Además, la RNE (ecuación (10)) permite extender esta correspondencia a la difusividad mediante la ecuación (12), donde D_p es el coeficiente de difusión del ion en la SP libre (sin microestructura) y D el coeficiente difusivo en el medio poroso. Esta equivalencia es exacta en dilución infinita y bajas concentraciones. Así, las MICR aíslan los efectos geométricos (representados por F) y evitan las complicaciones fisicoquímicas del campo eléctrico aplicado.

$$F = \frac{\sigma_p}{\sigma} = \frac{D_p}{D} \quad (12)$$

Snyder propuso en 2001 una formulación más rigurosa para relacionar el F con el coeficiente de difusión (ecuación 13). Su planteamiento muestra que la relación simple entre F y el coeficiente de difusión no es suficiente cuando los iones pueden existir en distintas especies químicas o formar pares iónicos complejos con movilidades diferentes [55]. Su análisis parte de la RNE (ecuación (10)), y muestra que el coeficiente efectivo en MICR depende solo de la red de poros, mientras que la actividad y el potencial de difusión recogen los efectos termodinámicos y electrostáticos. Sus resultados muestran que, aunque el coeficiente de difusión aparente varía con la composición y la concentración del electrolito, el F permanece prácticamente constante, lo que confirma que este último caracteriza únicamente la microestructura del material. En consecuencia, y dado que F permanece prácticamente invariable frente a cambios en la composición del electrolito, se puede expresar la difusividad efectiva como la autodifusión libre dividida por F , separando así los efectos microestructurales de los fisicoquímicos (ecuación 13)) [2,17,27-31,22,56,55,57].

$$F = \frac{D_p}{D} = \frac{D_0 [1+f(I, m, \gamma, \phi_p)]}{D_{eff} [1+f(I, m, \gamma, \phi_p)]} = \frac{D_{0,Cl}}{D_{eff,Cl}} \quad (13)$$

Donde: D_0 : coeficiente de auto-difusión en disolución infinita (self-diffusion, “libre” en solución diluida), $f(I, m, \gamma, \phi_p)$: función que agrupa los efectos fisicoquímicos (fuerza iónica, actividad y potencial de difusión) sobre el coeficiente de difusión.

Los coeficientes de autodifusión de referencia en agua destilada a 25°C son: $D_{0,Cl^-} = 2.03 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $D_{0,Na^+} = 1.33 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $D_{0,K^+} = 1.96 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $D_{0,Ca^{2+}} = 0.79 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ y $D_{0,OH^-} = 5.27 \times 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, valores que evidencian la alta movilidad de OH^- y Cl^- frente a cationes divalentes [12]. McCarter et al. cuestionan el uso de D_0 determinado en agua destilada pura, ya que ignora la composición alcalina real de la SP del hormigón, que modifica la difusividad efectiva de los iones. En su lugar, proponen que D_0 se calcule para la SP correspondiente a cada ensayo, es decir, coeficientes de difusión ajustados a la composición real de esa solución [58].

El D_0 describe el movimiento de los iones en solución acuosa sin restricciones, pero en el hormigón saturado debe ajustarse para obtener $D_{eff,Cl}$ debido a que las trayectorias de los poros son altamente tortuosas (τ entre 2 y 5) [59], la porosidad accesible (10–20% del volumen total) contribuye al flujo real [59], y la SP es más viscosa que el agua libre por la adsorción de moléculas en los geles C–S–H [60], lo que explica que $D_{eff,Cl}$ sea del orden de $10^{-12} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, es decir, aproximadamente 1000 veces menor que en solución libre [61].

Por tanto, a partir de la analogía física existente entre el transporte de carga eléctrica y el transporte de masa, establecida mediante el F en las ecuaciones (12) y (13), el coeficiente de difusión efectivo puede determinarse mediante la ecuación (14). Esta expresión cuantifica la difusividad del ión cloruro en función de la conductividad eléctrica del hormigón saturado y de la SP escalada por el coeficiente de autodifusión en disolución infinita.

$$D_{\text{eff,Cl}} = D_{0,\text{Cl}} \frac{\sigma}{\sigma_p} \quad (14)$$

Para determinar la conductividad de la SP (σ_p), se emplean modelos basados en la fuerza iónica que descomponen la conductividad total en la suma de las contribuciones individuales de cada especie, según la ecuación (15).

$$\sigma_p = \sum_i z_i^2 C_i \lambda_i \quad (15)$$

Esta formulación reconoce explícitamente que la conductividad molar iónica (λ_i) no permanece constante, sino que varía en función de la concentración (C_i) y de las interacciones electrostáticas del medio. Para cuantificar dichas interacciones, primero se calcula la fuerza iónica (IM) mediante la ecuación (16) [15,44,46,24], la cual pondera la concentración por el cuadrado de la valencia de los iones.

$$IM = \frac{1}{2} \sum_i z_i^2 \times c_i \quad (16)$$

Una vez obtenida la fuerza iónica, se ajusta la movilidad de cada especie utilizando la ecuación (17) [15,44,46,23,62], donde la conductividad a dilución infinita (λ_i^0) se divide por un factor de corrección que incluye el coeficiente empírico específico del ion (G_i), cuyos valores numéricos se detallan en la Tabla 1.

$$\lambda_i = \frac{\lambda_i^0}{(1 + G_i \sqrt{IM})} \quad (17)$$

Tabla 1: Valores Numéricos de Conductividades Equivalentes a Dilución Infinita (λ_i^0) a 25 °C [62]

Especie	$z \times \lambda_i^0$ (cm ² S/mol)	G (mol/l) ^{-1/2}
OH ⁻	198	0.353
K ⁺	73.5	0.548
Na ⁺	50.1	0.733
Cl ⁻	76.4	0.548
Ca ²⁺	59	0.771
SO ₄ ²⁻	79	0.877

Las ecuaciones (16) y (17) plantean que a medida que aumenta la concentración de iones, las interacciones electrostáticas se intensifican, reduciendo la movilidad efectiva de cada especie y, por tanto, su conductividad equivalente [44,23]. La concentración molar de las especies presentes en la SP se determina experimentalmente mediante métodos de análisis químico, como los que se abordan posteriormente en el epígrafe 6, a partir de los cuales se obtienen los valores de G_i que se introducen en las ecuaciones (15)–(17).

Este enfoque modela adecuadamente cómo el aumento de la concentración intensifica las interacciones electrostáticas y reduce la movilidad efectiva de los iones, logrando predecir la conductividad de la solución con un error inferior al 8% dentro en el rango de concentración K⁺: Na⁺ de 4:1 a 1:1 y fuerza iónica de 0.15 a 2.00 mol/l [62]. Más allá de la dinámica iónica en la solución pura, la influencia de la EDL se convierte en un factor determinante para comprender las desviaciones en las mediciones de conductividad y resistividad en el hormigón. La capa difusa de iones adsorbidos en la interfase sólido-líquido bajo la acción de un campo eléctrico externo, los iones pueden movilizarse a lo largo de la superficie del poro, añadiendo una contribución de conductividad superficial (σ_s) al flujo total.

Este mecanismo de transporte superficial altera la relación lineal clásica entre la conductividad de la solución y la del material, haciendo que la resistividad eléctrica medida sea menor a la esperada si solo se considerara el electrolito libre en los poros. El efecto de la EDL resulta significativo y crítico predominantemente en condiciones de baja fuerza iónica, es decir, cuando la concentración de sales en la SP es baja (soluciones diluidas). En este escenario, la conductividad 'bulk' del electrolito (σ) disminuye drásticamente, mientras que la conductividad superficial (σ_s) permanece relativamente constante o disminuye en menor proporción. Como consecuencia, la corriente eléctrica fluye preferentemente a través de la EDL adherida a las paredes del poro, dominando la respuesta eléctrica y falseando la estimación de la porosidad capilar si se utilizan modelos simplificados. Por ello algunos investigadores proponen una corrección a la estimación de la conductividad empleando el F, que tiene en cuenta el efecto de la EDL en el término σ_s (ecuación (18)) [17,56,55,57,22].

En un hormigón convencional saturado con una SP concentrada, la conductividad superficial suele ser despreciable. Sin embargo, en sistemas de alta durabilidad como el LC3, que combinan refinamiento de poros y reducción de álcalis (solución diluida), la conductividad superficial se convierte en un factor determinante para entender las mediciones eléctricas.

$$\sigma = \frac{\sigma_p}{F} + \sigma_s \quad (18)$$

Desde el punto de vista de la modelación, σ_s suele parametrizarse mediante una conductancia superficial específica y el área interna por volumen), o mediante términos ligados a la capacidad de intercambio catiónico en modelos tipo Waxman–Smits. Estos modelos incorporan explícitamente la química de superficie (densidad de sitios cargados, protonación/desprotonación, intercambio catiónico) y la estructura de la EDL (capa Stern + capa difusa). En este contexto, la determinación de σ_s resulta compleja debido a la multitud de variables que influyen en la movilidad iónica en la interfase sólido-líquido. Los detalles para ello pueden encontrarse en [63,40,64,41].

Limitaciones de la modelación del transporte iónico con el F en las MICR.

Si bien la modelación basada en el F se ha consolidado como una herramienta de gran utilidad en la práctica y ha proporcionado resultados ingenierilmente fiables, la comunidad científica continúa debatiendo ciertas limitaciones teóricas y condiciones de contorno que condicionan su precisión. A pesar de su éxito en aplicaciones estándar, se reconocen restricciones importantes para casos específicos, tales como: (i) la asunción de saturación completa, lo que los hace inaplicables directamente a hormigón parcialmente saturado donde intervienen efectos capilares, adsorción en interfaces aire-agua y la pérdida de conectividad porosa [9,10,63]; (ii) la distinción entre el transporte en estado estacionario y la retención de cloruros. Dado que el F solo contabiliza el fenómeno estacionario, es necesario complementar el modelo con isothermas empíricas (como Langmuir o Freundlich) para describir la fijación química y física durante el transporte no estacionario. Estas isothermas deben calibrarse para cada hormigón, ya que su comportamiento varía sensiblemente con el contenido de aluminato tricálcico, la relación a/c y la temperatura [8,21,22]; (iii) la validez de la RNE, estricta solo para soluciones diluidas, requiriendo correcciones mediante coeficientes de actividad en soluciones de poro concentradas y alcalinas [12,14,26]; (iv) y el hecho de que el F, al ser una propiedad medida eléctricamente, promedia la heterogeneidad microestructural (difuminando gradientes de porosidad en zonas interfaciales), sin capturar variaciones locales[27-31].

5. MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA EVALUACIÓN DEL TRANSPORTE DE CLORUROS EN HORMIGÓN: DIFUSIÓN, MIGRACIÓN Y RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.

A partir de los fundamentos teóricos descritos previamente se han diseñado numerosos métodos de ensayo para para estimar la difusión de cloruro en materiales cementicios que pueden clasificarse según el mecanismo de transporte que evalúan y la forma en que se realiza la medición (Figura 3). Los principales métodos para estimar la difusión de iones cloruro, se organizan en dos grandes grupos: métodos convencionales (de inmersión y encharcamiento) y métodos eléctricos. Dentro de estos últimos se distinguen los ensayos de migración acelerada y los métodos eléctricos indirectos (mediciones instantáneas de conductividad o resistividad).

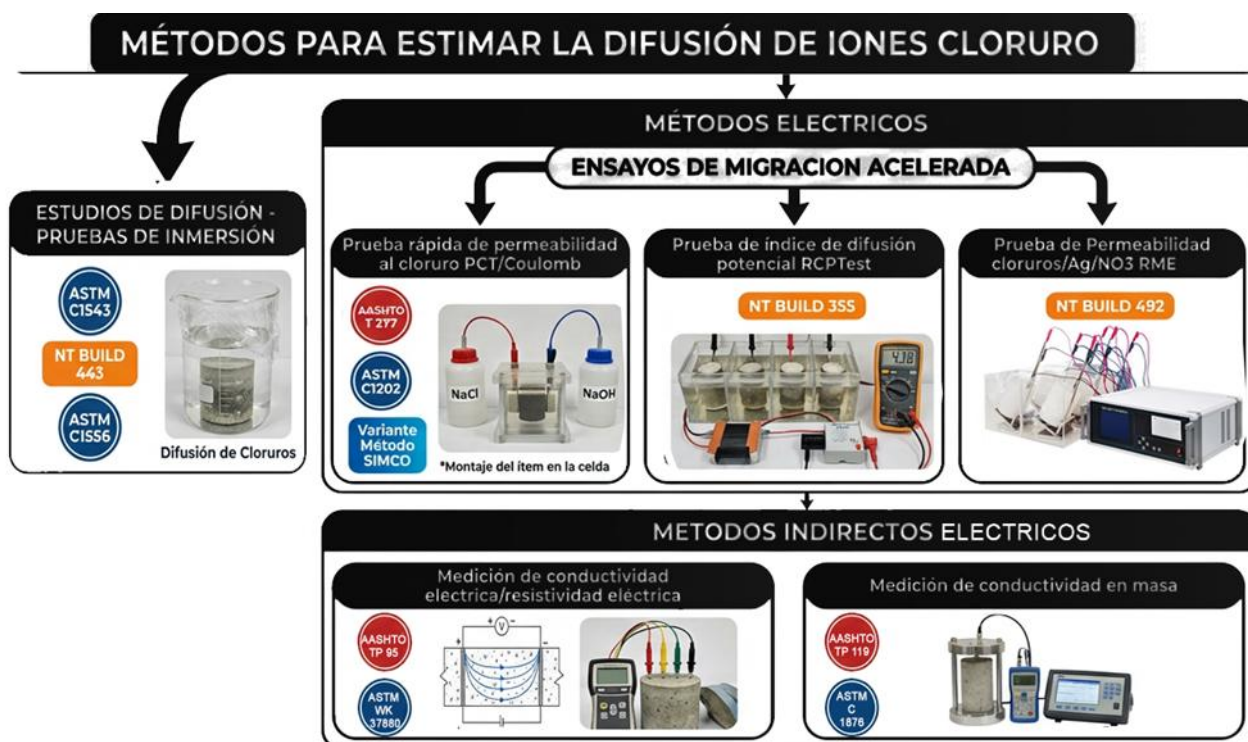


Fig. 3 - Esquema elaborado por el autor, adaptado a partir de métodos de ensayo para la evaluación del transporte de cloruro.

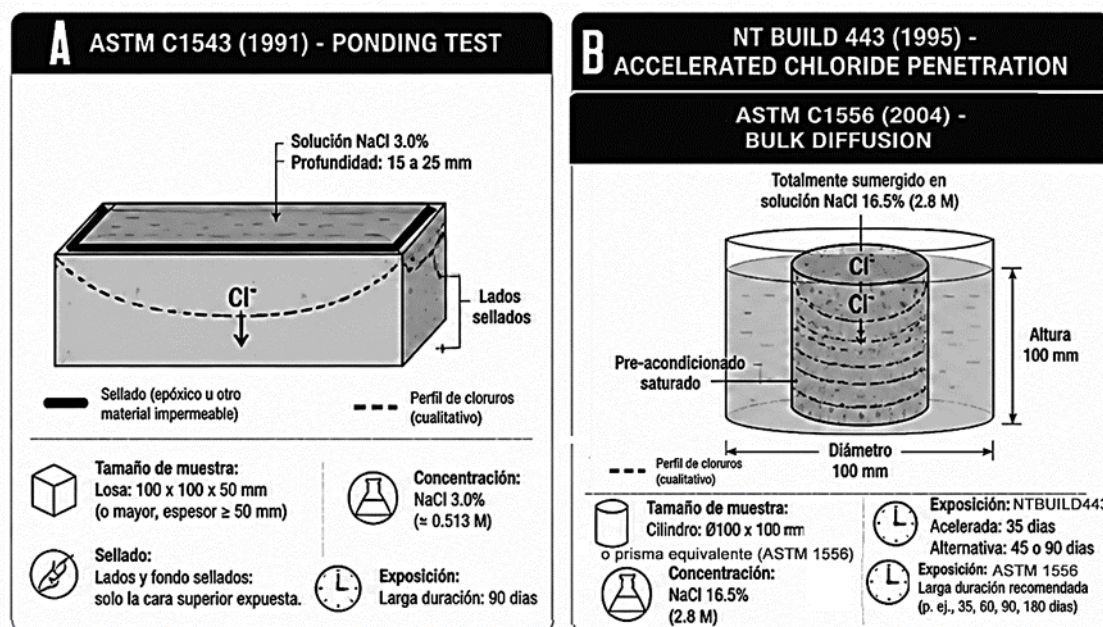


Fig. 4- Disposición experimental para pruebas de inmersión.

5.1 MÉTODOS DE DIFUSIÓN NATURAL

Los ensayos de difusión natural (Figura 4) constituyen los métodos de referencia para evaluar la penetración de cloruros en hormigón, ya que reproducen fielmente los mecanismos de transporte sin introducir alteraciones significativas. La metodología se basa en la exposición de cilindros de hormigón, completamente saturados con agua de cal (pre-saturación), a una solución de NaCl de concentración constante, manteniendo un tiempo mínimo de exposición que puede variar entre 35 días, 90 días y hasta un año.

Estos métodos han evolucionado desde protocolos iniciales largos y poco precisos [65-67,22,68,69] como el ASTM C1543 (1991) [70] (Figura 4A), caracterizado por realizar muestreos muy espaciados [7], hasta métodos más eficientes y exactos como el NT BUILD 443 (1995) [71] (Figura 4B), y el ASTM C1556 (2004) [72] (Figura 4B).

En la actualidad, los protocolos para determinar perfiles de concentración de cloruros se basan en la extracción de polvo a diferentes profundidades y su análisis químico posterior. Al ajustar estos resultados a la segunda ley de Fick, se calcula el coeficiente de difusión aparente (D_a) y la concentración superficial (C_s), lo que ofrece información directa sobre la resistencia del hormigón a la penetración de cloruros y su capacidad de fijación química. La principal mejora de estos métodos de inmersión ha sido la implementación de tiempos de exposición más cortos y soluciones más concentradas; esto genera perfiles con mejor definición espacial y permite estimar el coeficiente de difusión con mayor precisión [73].

Estos métodos ofrecen ventajas como su alta representatividad de condiciones reales, validez para todo tipo de cementos y adiciones minerales, y su capacidad para validar modelos de vida útil. Los coeficientes de difusión obtenidos por estos métodos se utilizan habitualmente como referencia para validar coeficientes derivados de ensayos de migración y relaciones empíricas basadas en resistividad eléctrica [74-76,66,67]. Sin embargo, tienen limitaciones importantes: requieren periodos de ensayo extensos, consumen muchas muestras y solución salina, y muestran alta variabilidad debido a la heterogeneidad del hormigón. También resulta difícil mantener condiciones constantes durante todo el periodo, y el proceso de análisis es laborioso, costoso y poco práctico para el control de calidad rutinario. Estas restricciones han impulsado el desarrollo de métodos acelerados complementarios, aunque estos necesariamente deben validarse previamente mediante los ensayos naturales [77-79].

En este contexto, los métodos eléctricos se presentan como herramientas complementarias que permiten reducir drásticamente el tiempo de ensayo, pero que requieren ser calibrados frente a los ensayos de difusión natural para garantizar su validez.

5.2 MÉTODOS ELÉCTRICOS

Los métodos eléctricos representan una alternativa eficiente a los ensayos de difusión natural, reduciendo los tiempos de ensayo. No obstante, la gran mayoría de los métodos eléctricos (superficiales, volumétricos y de migración) tienen limitaciones físicas y procedimentales. La presencia de acero de refuerzo altera el campo eléctrico y actúa como un camino de baja resistencia ("cortocircuito"), lo que invalida la medición de la resistividad del material independientemente del equipo utilizado, un fenómeno extensamente documentado en estudios de modelado numérico y pruebas experimentales [80-82]. Asimismo, la dependencia de la edad y el curado es una condición de contorno intrínseca a la naturaleza electrolítica del hormigón; su resistividad varía significativamente debido a la evolución de la microestructura durante la hidratación y a cambios en el contenido de humedad, por lo que la falta de estandarización en estos factores compromete la fiabilidad y comparabilidad de los datos en cualquier ensayo eléctrico [12,52,83].

Estos métodos aplican un campo eléctrico externo (generalmente entre 10 y 60 V) que fuerza el movimiento direccional de los iones, regido por la ecuación de Nernst-Planck. Dependiendo del régimen de flujo, es posible determinar coeficientes de migración en estado no estacionario (D_{nssm}), donde el flujo es variable, o en estado estacionario (D_{mss} o D_{eff}), donde el flujo se vuelve constante. Si bien su principal ventaja es la rapidez, ideal para el control de calidad industrial, estos métodos alteran las condiciones naturales de servicio al acelerar artificialmente el transporte iónico, y por lo general reflejan la difusividad de cloruros libres sin capturar completamente los efectos complejos de fijación química/física del hormigón. A continuación, se detallan los métodos más representativos.

ASTM C1202: Prueba rápida de permeabilidad al cloruro (RCPT) (prueba de Coulomb)

La variante de ensayo eléctrico más empleada es el ensayo de permeabilidad rápida a cloruros, conocido como RCPT (1981) y estandarizado en ASTM C1202 (1994) (Figura 5a) [84].

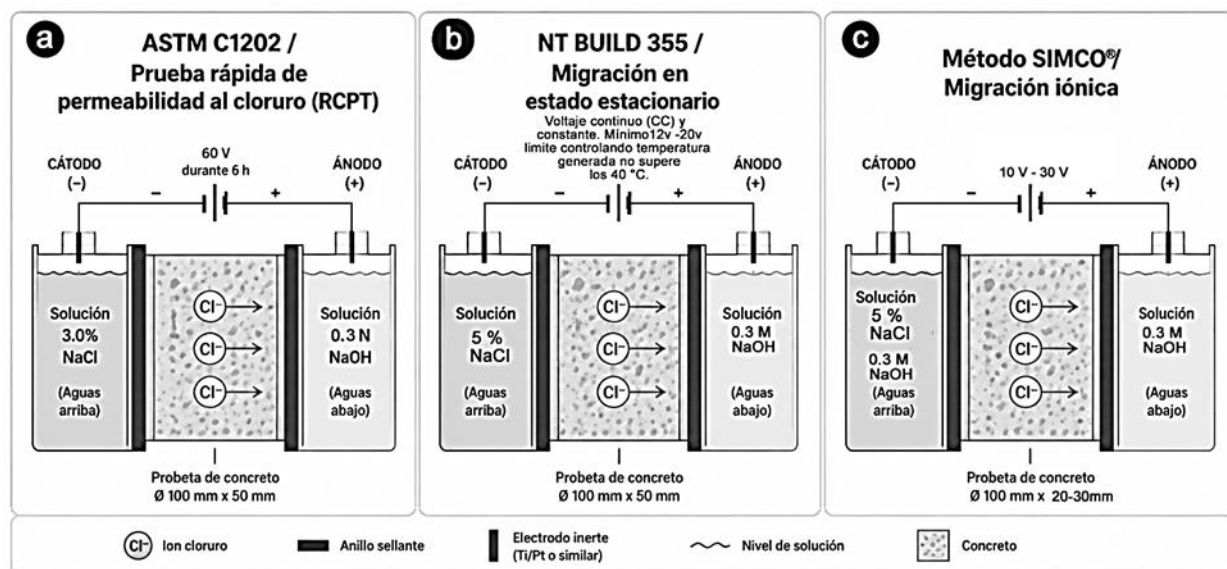


Fig. 5- Disposición experimental para una prueba de migración.

El método ASTM C1202 es una prueba acelerada diseñada para evaluar la conductancia eléctrica del hormigón como un indicador rápido de su resistencia a la penetración de iones cloruro. El procedimiento comienza con la preparación de probetas en discos de 50 mm de espesor cortados de cilindros o núcleos de 100 mm de diámetro nominal, los cuales deben ser curados bajo condiciones controladas —generalmente 28 días para hormigones estándar o hasta 56 días si contienen materiales cementicios suplementarios—. Antes del ensayo, las probetas se someten a un riguroso proceso de saturación bajo vacío: se aplica una presión absoluta inferior a 50 mm de Hg durante tres horas, se introduce agua desaireada sin romper el vacío por una hora adicional y finalmente se sumergen las muestras en agua durante 18 ± 2 horas. Posteriormente, se sellan los laterales de la probeta con un recubrimiento impermeable y se montan las celdas; se llena un lado con solución al 3.0% de cloruro de sodio (NaCl) (conectado al terminal negativo) y el otro con 0.3 N de solución de hidróxido de sodio (NaOH) (conectado al terminal positivo). Se aplica una diferencia de potencial de 60 V DC a través de la probeta durante un periodo de 6 horas, monitoreando cada 30 minutos la corriente para calcular la carga total en culombios que atraviesa el espécimen, donde un menor paso de carga indica una mayor resistencia al cloruro. Esto permite clasificaciones ordinales, requiriendo factores de correlación empíricos para relacionarlo con difusión natural real [13]. Este ensayo proporciona un índice relativo útil para la comparación entre mezclas.

Las ventajas de este método incluyen un tiempo de ensayo muy corto de solo 6 horas, resultados numéricos directos que permiten clasificación del hormigón según categorías establecidas, utilidad para control de calidad y comparación entre mezclas y sensibilidad a cambios en la microestructura del hormigón [84,14,85-89].

No obstante, el método presenta limitaciones fundamentales que requieren una interpretación cuidadosa. En primer lugar, no cuantifica directamente la difusión de cloruros [90], sino la conductividad eléctrica total del hormigón; la corriente medida incluye el aporte de todos los iones presentes en la SP [91]. Además, el calentamiento significativo de la muestra durante el ensayo —que puede alcanzar entre 80 y 90 °C— y el alto voltaje aplicado tienen el potencial de alterar la microestructura del material e inducir reacciones electroquímicas que no son representativas de las condiciones reales de servicio [76].

En segundo lugar, la prueba muestra una alta sensibilidad a la composición química del hormigón. Tiende a sobrestimar la permeabilidad en concretos con alto contenido de álcalis y a subestimarla en aquellos con bajo contenido [85].

NTBUILD-355. Prueba de migración en estado estacionario.

Por su parte, el método NT BUILD 355 [92] (Figura 5b) determina el coeficiente de difusión de iones cloruro en estado estacionario. La preparación de las probetas comienza con cilindros de 95 a 100 mm de diámetro y una longitud mínima de 200 mm, los cuales pueden ser moldeados o extraídos por perforación. Estos cilindros se curan en agua hasta los 90 días y posteriormente se sumergen en una solución saturada de hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ hasta que su masa se estabilice. A continuación, se secan superficialmente, se recubren los laterales con resina epoxi para asegurar que el flujo sea unidireccional y se cortan en discos de aproximadamente 50 mm de espesor. Estas muestras se vuelven a saturar en la solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hasta lograr masa constante antes de ser montadas en la célula de prueba.

Para la ejecución del ensayo, la probeta se coloca en la célula de migración y después de verificar que no existen fugas utilizando una solución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, se llena el lado negativo (ánodo) con una solución al 5% de NaCl y el lado positivo (cátodo) con una solución al 0.3 N de NaOH. Se aplica un voltaje constante de al menos 12 voltios, vigilando que la temperatura de la probeta no exceda los 40°C. Se mide la caída de voltaje real a través de la muestra mediante electrodos de referencia y se recomienda medir la resistencia eléctrica y el peso de la probeta antes y después del test para control de calidad [92].

El monitoreo del ensayo se realiza en dos fases. Inicialmente, se utiliza una prueba cualitativa con nitrato de plata para detectar el momento en que los iones cloruro comienzan a penetrar la muestra. Una vez detectada la presencia de cloruros (precipitado blanco), se inicia la medición cuantitativa de la concentración de cloruro en el compartimento de NaOH al menos una vez al día durante un mínimo de 7 días. Los datos recopilados deben mostrar un aumento lineal de la concentración respecto al tiempo, requiriéndose un coeficiente de correlación de al menos 0.9 para garantizar la validez del estado estacionario [92].

Finalmente, el cálculo de resultados se obtiene determinando primero el flujo de cloruros a partir de la pendiente de la curva de concentración-tiempo, el volumen del compartimento receptor y el área de la probeta. Utilizando este flujo y parámetros como la temperatura absoluta, el espesor de la muestra, la concentración inicial de cloruro y la caída de voltaje promedio, se calcula el coeficiente de difusión mediante una ecuación derivada de la ley de Nernst-Planck [92].

La ventaja principal es que reduce el tiempo de ensayo sin sacrificar excesivamente la precisión respecto a los métodos de difusión natural. No obstante, su duración prolongada, la complejidad del análisis químico y la necesidad de alcanzar condiciones cercanas al estado estacionario limitan su empleo en el control de calidad rutinario en comparación con el ASTM C1202.

Prueba de migración iónica SIMCO®

El procedimiento de migración iónica (Ion Migration Test) desarrollado por la empresa SIMCO® (Figura 5c) constituye una versión modificada del ensayo RCPT, con un alcance más amplio que la simple medición de la carga total. A diferencia de este último, que entrega principalmente un indicador cualitativo de la penetrabilidad del concreto a partir de los culombios acumulados, el protocolo de SIMCO agrupa una serie de ensayos destinados a obtener parámetros de transporte y características geométricas del material, que se utilizan posteriormente en el modelado de durabilidad mediante el software STADIUM® (Software for Transport and Degradation in Unsaturated Materials).

En términos operativos, el ensayo de migración de SIMCO comparte con la norma NT BUILD 355 el uso de un campo eléctrico controlado y la limitación del voltaje aplicado normalmente entre 16 y 20 V, con un máximo cercano a 30 V. La diferencia técnica clave es la presencia de NaOH en ambas celdas, lo que reduce la formación de gradientes químicos opuestos al campo eléctrico y, en consecuencia, minimiza la difusión inversa y favorece que el transporte de cloruros esté gobernado principalmente por el campo eléctrico aplicado. De este modo, el flujo de cloruros medido representa con mayor fidelidad la migración forzada a través de la muestra. Para el ensayo se preparan discos cilíndricos de hormigón, que se saturan al vacío con una solución de NaOH, se sellan lateralmente y se montan en una celda de migración. En una cámara se coloca una solución de NaCl + NaOH y en la otra solo NaOH. Durante el ensayo se impone un potencial constante y se registran simultáneamente la corriente I , el voltaje efectivo y la evolución de la concentración de cloruros en la celda receptora. A partir de estos parámetros, el modelo asociado al método estima el coeficiente efectivo de difusión y la tortuosidad inversa del material, proporcionando valores cuantitativos de transporte adecuados para el modelado de durabilidad.

Considerando que el acceso al software STADIUM® es limitado por tratarse de una herramienta comercial, puede plantearse una metodología alternativa para estimar el coeficiente de difusión a partir de los resultados del ensayo SIMCO®. En este enfoque se aprovecha la información experimental obtenida en la celda de migración, especialmente la corriente en régimen estacionario (I_{ss}), para calcular primero la conductividad eléctrica asociada al ensayo y, posteriormente, aplicar la RNE con el fin de estimar el coeficiente efectivo de difusión de cloruros [94,95].

Esta adaptación del ensayo de migración iónica fue utilizada en el marco del proyecto colaborativo cubano-suízo bajo la visión del profesor Fernando Martirena y con el apoyo técnico de Pierre Henocq, con el objetivo de abordar las particularidades físicas y químicas de los cementos ternarios (arcilla calcinada y caliza) [93].

NTBUILD -492. Coeficiente de migración de cloruro a partir de experimentos de migración en estado no estacionario.

El método NT BUILD 492 [97] establece un procedimiento para determinar el coeficiente de migración de cloruros en estado no estacionario (Figura 6). El ensayo requiere probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 50 mm de espesor, las cuales son sometidas inicialmente a una saturación bajo vacío en una solución de hidróxido de calcio para asegurar el llenado de los poros. A diferencia de otros métodos, la configuración física utiliza un manguito de goma en el que se inserta la probeta, reemplazando el diseño de celdas rígidas se acoplan a la muestra. Este cambio está diseñado principalmente para optimizar el sellado y simplificar la preparación de la probeta, ya que la goma elástica, comprimida mediante abrazaderas, se adapta automáticamente a las irregularidades de la superficie lateral del hormigón. El compartimento superior (ánodo) se llena con una solución de NaOH (0.3 N), mientras que el conjunto se sumerge en un gran depósito externo (cátodo) con NaCl (10%). Se aplica un voltaje inicial de 30 V y se ajusta según la corriente inicial para definir una duración de ensayo que varía entre 6 y 96 horas. Finalizado el test, la probeta se parte axialmente y se rocía con nitrato de plata para visualizar el frente de penetración de cloruros (un precipitado blanco), midiendo la profundidad para calcular el coeficiente de migración mediante una ecuación basada en la ley de Nernst-Planck a partir además del voltaje aplicado, la duración del ensayo, y la temperatura [14,98,99,95,100].

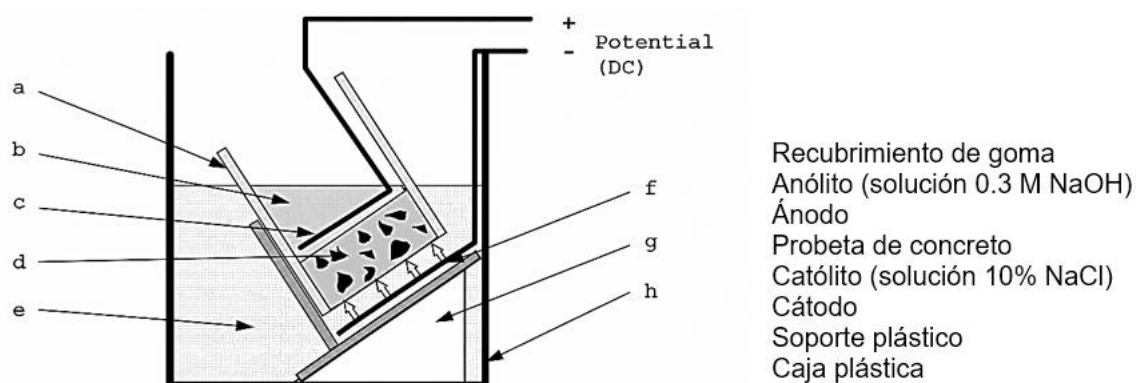


Fig. 6- Disposición experimental para la prueba de migración rápida .

Entre las principales ventajas de este método destaca su capacidad para proporcionar un resultado cuantitativo (D_{nssm}) que es esencial para modelos de predicción de vida útil, a diferencia de pruebas cualitativas como la ASTM C1202. Asimismo, ofrece la ventaja visual de inspeccionar el interior del material para detectar defectos o heterogeneidades, y su diseño con manguito de goma simplifica el sellado lateral de las muestras, evitando el uso complejo de epoxi o juntas rígidas, especialmente útil en núcleos extraídos de estructuras existentes. Además, al ser un ensayo de estado no estacionario, no es necesario esperar a que los iones atraviesen toda la probeta, reduciendo el tiempo de prueba en comparación con los métodos de difusión natural [101-103].

Sin embargo, el método presenta desventajas significativas relacionadas con la comparabilidad de los datos. La norma advierte explícitamente que el coeficiente D_{nssm} calculado no es comparable directamente con los coeficientes de difusión obtenidos mediante ensayos de inmersión natural o migración en estado estacionario, lo que limita la comparación con datos históricos o estudios que utilicen otras normativas [104,105]. Adicionalmente, la reproducibilidad del ensayo es baja, principalmente en hormigones con MCS, donde puede alcanzar hasta el 24% [106,76]. Por último, el procedimiento es destructivo (requiere partir la probeta) y la medición manual de la profundidad de penetración puede introducir subjetividad si el frente es irregular o está bloqueado por agregados gruesos [107].

5.2.2 Métodos de resistividad eléctrica

Los métodos de resistividad eléctrica se pueden clasificar principalmente en métodos directos e indirectos, distinción que se fundamenta en el tipo de acoplamiento físico que se establece entre el equipo de medición y la superficie del hormigón.

Los métodos directos, también conocidos como galvánicos, se basan en el contacto físico directo entre electrodos metálicos y la superficie del material. En este enfoque, el flujo de corriente eléctrica se establece mediante conducción iónica a través de la SP del hormigón, lo que obligatoriamente requiere el uso de un medio acoplante — como esponjas húmedas, paños saturados o geles conductores— para asegurar una conexión eléctrica adecuada y minimizar la resistencia de contacto. Durante el ensayo, se aplica generalmente una corriente alterna de baja frecuencia para evitar la polarización de los electrodos y se mide la diferencia de potencial resultante para calcular la resistividad mediante la Ley de Ohm y factores geométricos. Las técnicas más representativas de este grupo son el método de las cuatro puntas (sonda Wenner) y el método de dos electrodos (uniaxial). La gran ventaja de estos métodos radica en su robustez, bajo costo y la existencia de un marco normativo claro; sin embargo, presentan la desventaja de exigir una preparación meticulosa de la superficie (que debe estar limpia y húmeda) y son sensibles a factores como la temperatura, humedad, la presión aplicada sobre el sensor o la presencia de capas superficiales alteradas, como la carbonatación.

Por otro lado, los métodos indirectos o no galvánicos eliminan la necesidad de un contacto eléctrico directo, utilizando el aire como medio de conexión a través de campos eléctricos o magnéticos, en un proceso conocido como acoplamiento capacitivo. En estos métodos, los electrodos del sensor se posicionan a una pequeña distancia de la superficie del hormigón sin tocarla, formando un capacitor donde la propia superficie del material actúa como una de las placas. La medición se basa en la respuesta dieléctrica e impedancia compleja del material ante un campo electromagnético de alta frecuencia, en lugar de la inyección directa de iones. Dentro de esta categoría se encuentran los sensores capacitivos de cuatro puntas y los métodos de inducción electromagnética. Sus ventajas más notables son la rapidez extrema y la ausencia de preparación de la superficie, ya que pueden medir sobre hormigones secos o rugosos sin necesidad de mojarlos, lo que los hace ideales para el escaneo rápido de grandes estructuras. Como contrapartida, el equipamiento es más costoso, la profundidad de investigación puede ser menor y no están normalizados como los métodos de contacto.

Método de resistividad superficial

El método de resistividad eléctrica por el método de las cuatro puntas (Figura 7a), conocido como Wenner Probe, mide la resistividad eléctrica superficial y ha sido estandarizado en AASHTO TP 95-11 [108].

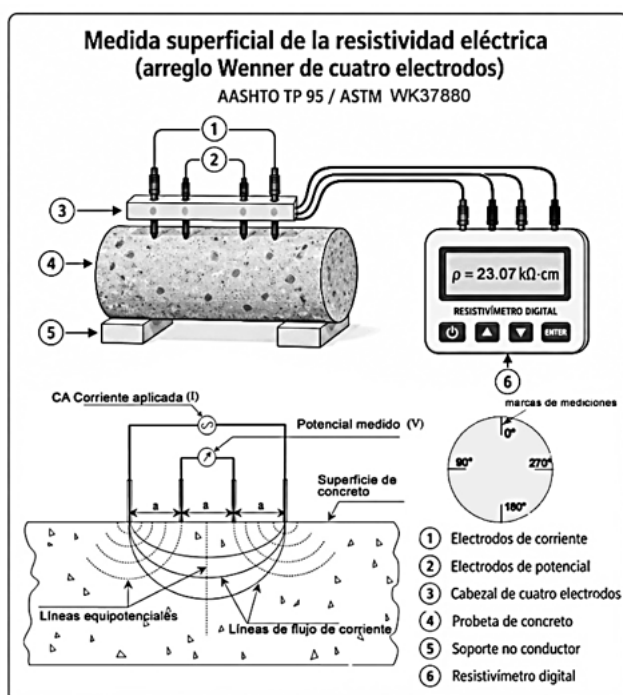


Fig. 7a. Disposición experimental para el montaje de la prueba de resistividad superficial

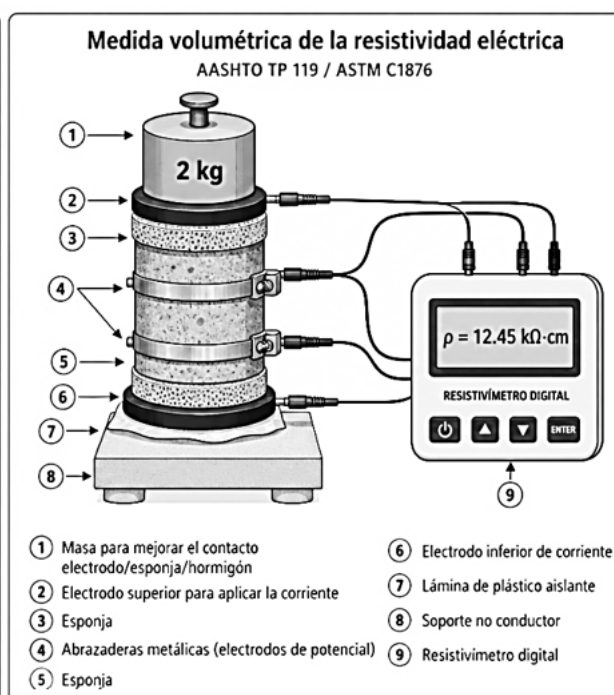


Fig. 7b. Disposición experimental para el montaje de la prueba de resistividad volumétrica.

Este procedimiento se aplica habitualmente a cilindros o núcleos de 100x200 mm o 150x300 mm que deben mantenerse en condiciones de saturación, conservando una humedad relativa del 100% desde el momento del desmolde hasta el ensayo. Para la medición, se utiliza un array de cuatro electrodos con una separación de 38,1 mm (1,5 pulgadas) que se posiciona sobre la cara lateral de la muestra; a través de los pines externos se aplica una corriente alterna, mientras se mide la diferencia de potencial en los internos. Con el fin de garantizar la fiabilidad del dato, se registran mediciones en cuatro puntos de la circunferencia (0°, 90°, 180° y 270°), repitiendo el ciclo completo dos veces para obtener un promedio. Finalmente, se calcula el promedio del conjunto de muestras y, si estas fueron curadas en tanque de agua de cal, se aplica un factor de corrección multiplicando el resultado por 1,1, ya que este método tiende a reducir la resistividad en un 10 % en comparación con el curado en cámara húmeda. La resistividad se calcula a partir de la geometría de la muestra, de la disposición de los electrodos y las mediciones eléctricas. El valor resultante se clasifica cualitativamente —en categorías como Alta, Moderada, Baja, Muy baja o Despreciable— contrastándolo con los umbrales establecidos en la Tabla 1 de la norma.

Método de resistividad volumétrica

La determinación de la resistividad eléctrica volumétrica (o "bulk"), se fundamenta en el método de dos electrodos (configuración uniaxial) establecido en la norma ASTM C1876-19 y AASHTO TP 119[109,110] (figura 7b). El ensayo se realiza habitualmente sobre cilindros de hormigón de dimensiones estándar (como 100 mm x 200 mm o 4 x 8 pulgadas), los cuales se colocan entre dos placas metálicas conductoras. Para asegurar un óptimo contacto eléctrico y minimizar la resistencia de la interfaz, se interponen entre las placas y las caras del cilindro elementos conductores saturados, generalmente esponjas o paños de tela humedecidos. Se aplica una corriente eléctrica alterna de baja frecuencia a través de la muestra para evitar la polarización de los electrodos y se mide la caída de potencial resultante. Finalmente, la resistencia eléctrica medida se convierte en resistividad volumétrica utilizando la geometría de la probeta, multiplicando la resistencia por el factor de forma (área de la sección transversal dividida por la distancia entre los electrodos).

La resistividad eléctrica del hormigón constituye un indicador fundamental de su porosidad y durabilidad, pero su evaluación precisa exige corregir la discrepancia entre las lecturas superficiales obtenidas mediante el método Wenner y la realidad volumétrica del material, ya que las líneas de corriente en un cuerpo finito no se comportan igual que en un medio infinito. Para subsanar esta distorsión provocada por los bordes de la probeta, se aplican factores de corrección geométrica; específicamente, el estudio de Oğulcan et al. [129] adopta un factor fijo de 1,93 [111] para cilindros de 4x8 pulgadas, dividiendo el valor superficial medido por este número para obtener la resistividad volumétrica real, un enfoque que también se alinea con los factores empíricos tabulados por Andrade [112]. La corrección de la resistividad superficial a resistividad volumétrica es un paso fundamental, porque el valor volumétrico corregido se utiliza como referencia para el cálculo del F. En la Sección 4 se detalla cómo estos valores de resistividad permiten estimar el coeficiente de difusión aparente a través del concepto de F.

Además de los métodos aquí descritos, se han propuesto configuraciones de migración y técnicas de resistividad capacitivas o inductivas no normalizadas, empleadas principalmente en investigación y que aún no cuentan con un respaldo normativo equivalente.

5.3 Comparación y correlaciones entre métodos

La correlación más estudiada entre la carga del ensayo ASTM C1202 y los coeficientes de migración obtenidos con ensayos tipo NT BUILD 492 o pruebas de migración rápida es claramente no lineal, con coeficientes de determinación típicos en el rango $R^2 \approx 0.70-0.90$, y una dispersión atribuida a que el RCPT mide la conductividad eléctrica total del hormigón mientras los ensayos de migración cuantifican directamente la penetración de cloruros. En consecuencia, hormigones con elevado contenido de álcalis tienden a sobreestimar la carga medida en RCPT respecto al coeficiente real de migración, mientras que mezclas con menor conductividad de la SP pueden presentar la situación opuesta [85,113,114].

Se han propuesto numerosas ecuaciones empíricas para relacionar la carga RCPT con un coeficiente de migración equivalente, habitualmente de tipo logarítmico o potencial. Una formulación frecuentemente citada es $DRCM = a \times Q^b$, donde DRCM es el coeficiente de migración (expresado en $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$), Q es la carga RCPT en culombios y a , b son constantes empíricas dependientes del tipo de hormigón. Para hormigones con cemento Portland ordinario sin adiciones, se han reportado valores de a del orden de 10 000–15 000 y exponentes $b \approx 0.8-1.0$, aunque estos parámetros pueden variar de forma significativa en mezclas con materiales cementantes suplementarios. Por ello, la recomendación general es establecer correlaciones específicas para cada familia de hormigón de interés [86,115,116], en lugar de aplicar ecuaciones genéricas sin calibración previa.

Diversos autores han mostrado de forma consistente que los coeficientes de difusión obtenidos en condiciones naturales son inferiores a los coeficientes de migración determinados bajo campo eléctrico para un mismo hormigón, con factores de conversión típicamente comprendidos entre 2 y 10 [117,118,69,73,119]. Este factor tiende a ser menor en cementos Portland ordinarios y aumenta al incorporar materiales cementantes suplementarios, ya que la mayor capacidad de fijación de cloruros y las diferencias en la microestructura afectan en mayor medida a la difusión natural que al transporte acelerado por migración.

En cuanto a la resistividad eléctrica, se ha observado que hormigones con alta resistividad presentan, en general, coeficientes de difusión y migración más bajos, y viceversa. Los estudios experimentales confirman esta relación inversa, pero también evidencian una dispersión considerable asociada a la capacidad de fijación de cloruros y a la variabilidad de la SP, factores que modifican el coeficiente de difusión aparente sin alterar necesariamente la resistividad medida [75,120,121]. Para capturar esta relación se han propuesto ecuaciones empíricas del tipo $D=a/\rho^b$, donde D es el coeficiente de difusión o migración, ρ es la resistividad, y a , b son constantes empíricas. En hormigones con cemento Portland ordinario, el exponente b suele ser cercano a 1, en línea con la relación de Nernst–Einstein, mientras que en hormigones con materiales cementantes suplementarios puede desviarse de esa unidad debido a los efectos de fijación de cloruros y a cambios en la conectividad de la red porosa. Se han propuesto correlaciones más complejas que incorporan explícitamente el tipo de cemento, la relación agua/cemento y la edad del hormigón, logrando mejorar la precisión de las estimaciones a costa de reducir la simplicidad y universalidad de las ecuaciones.

6. MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD O LA CONCENTRACIÓN MOLAR DE LA SP DEL HORMIGÓN

Los métodos para medir la conductividad SP del hormigón (Figura 8) consideran, en primer lugar, la aplicación de métodos de extracción (PWE, CWE y celda Hassler), que permiten obtener la solución desde el interior del material y, en segundo lugar, la utilización de métodos para determinar sus propiedades. Estos últimos incluyen procedimientos de medición directa de la conductividad eléctrica sobre la solución extraída y procedimientos indirectos basados en su análisis químico (por ejemplo, mediante fotometría de llama, espectrometría de absorción atómica, titulación ácido–base y electrodos redox de plata/cloruro de plata), con los cuales se determina la concentración molar de las especies iónicas disueltas.

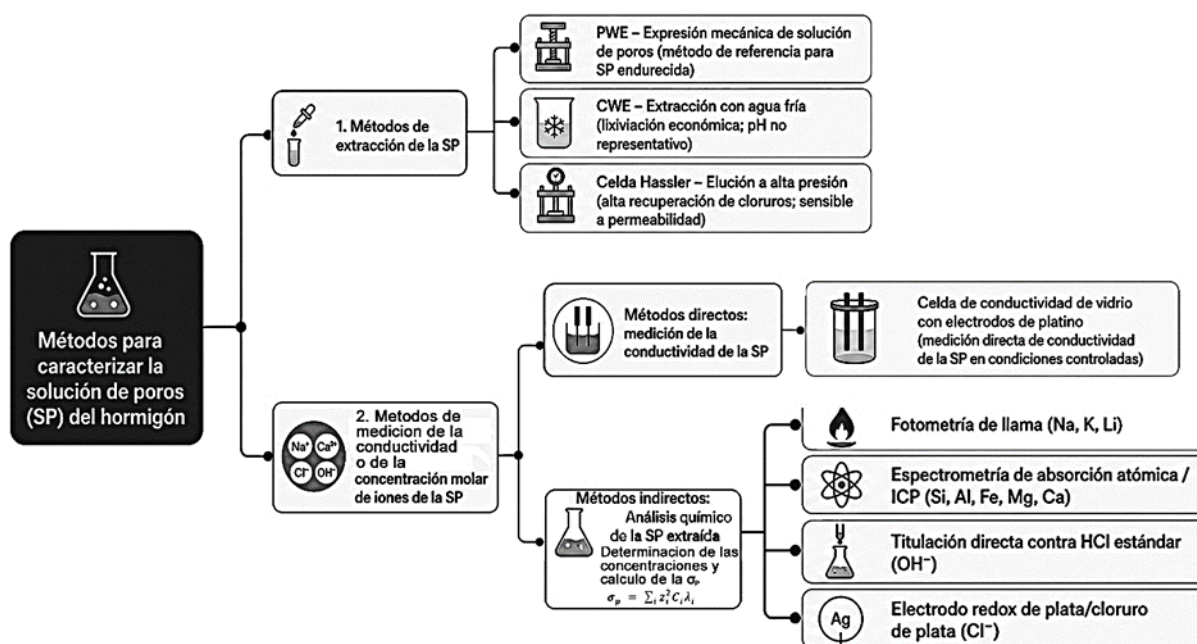


Fig. 8- Esquema de los métodos empleados para caracterizar la SP del hormigón.

Entre los métodos de extracción, la Extracción de Agua de Poros (PWE, Pore Water Expression) constituye la técnica de referencia, desarrollada originalmente por Longuet et al. Este procedimiento consiste en remover la SP mediante presión mecánica utilizando un aparato especializado compuesto por dos cilindros de acero de pared gruesa concéntricos (Figura 9a) [122],[91]. El proceso implica aplicar presiones del orden de 550 MPa a una muestra de aproximadamente 250 g de pasta o mortero endurecido durante varios minutos, mientras la solución se extrae a través de un anillo de drenaje en la placa base donde se recoge. Si bien la magnitud de la presión máxima aplicada ha generado preocupaciones sobre su efecto en la concentración de metales alcalinos, diversos investigadores han concluido que no existe una influencia significativa de la presión de extracción en el rango de 200-1000 MPa. Este método proporciona un "instantáneo" de las concentraciones existentes en el momento y es el procedimiento recomendado para validar otros métodos; sin embargo, presenta limitaciones importantes al ser relativamente ineficiente para materiales con bajo contenido de agua libre, como muestras antiguas o con baja relación agua/cemento. El rendimiento obtenible se reduce progresivamente conforme avanza la hidratación, especialmente en muestras con relaciones agua/cemento moderadas y bajas mayores de 56 días, que pueden producir volúmenes excesivamente pequeños [123].

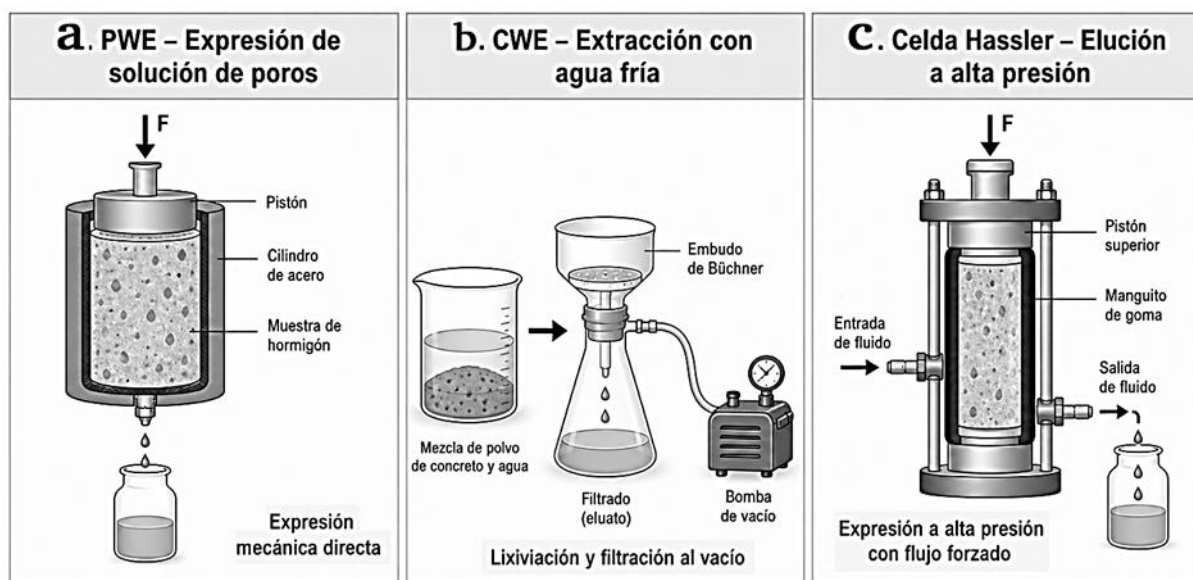


Fig. 9 a. Diagrama esquemático del aparato de expresión de SP (PWE). b-Diagrama esquemático del método de extracción con agua fría (CWE). c. Diagrama esquemático de la celda Hassler para elución a alta presión.

Como alternativa a la PWE, la Extracción con Agua Fría (CWE, Cold Water Extraction) representa un método de lixiviación ex-situ que requiere únicamente equipo básico. Consiste en triturar la muestra, mezclarla con un líquido de extracción y filtrarla tras un período de lixiviación. El procedimiento estándar involucra mezclar 20 g de polvo (con tamaño de grano máximo de 80 μm) con 20 g de agua desionizada, agitar durante 5 minutos y filtrar durante aproximadamente 1 minuto usando una bomba de agua y un filtro de celulosa Whatman Grado 40 de 8 μm (Figura 9b). Posteriormente, la muestra se diluye 10 veces con agua desionizada y se acidifica con HNO_3 hasta una concentración final de 0.1 mol/l para el análisis posterior de Na y K mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Es crucial que el agua de extracción sea agua desionizada hervida, almacenada en una botella de vidrio sellada y enfriada a temperatura ambiente antes del experimento para remover el aire (incluyendo CO_2) y prevenir la carbonatación subsecuente. Aunque este método ofrece bajo costo, disponibilidad de equipo y un procedimiento relativamente simple, presenta limitaciones significativas: el pH medido directamente o por titulación de iones hidroxilo en la solución extraída no es representativo del pH de la SP debido a la disolución de portlandita en el agua, que libera iones OH^- . Además, existe la posible liberación de metales alcalinos unidos durante el CWE, y los agregados también pueden liberar metales alcalinos, llevando a una sobreestimación. Las recomendaciones establecen que una relación agua/sólido dentro del rango de 2-10 puede producir resultados de pH consistentes para todos los tipos de materiales cementosos, siendo la relación óptima agua/sólido de 2 para la medición de pH de alta precisión en morteros de cemento [123,124].

Finalmente, la elución a alta presión mediante celda Hassler (Figura 9c) representa un método alternativo que permite que la SP se eluya mediante el bombeo de un líquido para su posterior recolección y análisis de iones como el cloruro. En este procedimiento, cada núcleo se satura al vacío con agua antes de colocarse en la celda Hassler y se lava con agua desionizada durante 30 minutos. La muestra se encapsula en una manga de goma nitrílica a la que se aplica una presión de confinamiento que excede la presión del líquido fluyendo a través de la muestra; esto sella la cara circunferencial y asegura un flujo axial. El eluyente se recoge durante los primeros 400 segundos y subsecuentemente en intervalos de 200 segundos por un total de 30 minutos. Este método presenta la ventaja de ser capaz de recuperar una proporción significativamente mayor del cloruro incorporado conforme avanza el curado; sin embargo, enfrenta limitaciones importantes, ya que cementos con relaciones agua/cemento y cemento/arenas más bajas son demasiado impermeables para permitir un flujo medible. Además, muestra mayor sensibilidad a la composición de la mezcla que el método de expresión, y la saturación deliberada con agua diluye la SP, causando que los componentes reajusten sus equilibrios y resultando en la liberación de cloruro unido, lo que puede comprometer la representatividad de las mediciones [122].

Cabe señalar que, además de los procedimientos aquí esquematizados (PWE, CWE, y la celda Hassler), la literatura describe variantes operativas de PWE y CWE, así como enfoques basados en modelado termodinámico de equilibrio químico, que se consideran extensiones de estos métodos experimentales más que técnicas independientes.

Los métodos de extracción de SP presentan ventajas claras, pero también limitaciones importantes que condicionan su aplicación práctica. En términos generales, la PWE permite obtener una instantánea relativamente representativa de la composición real de la SP en el momento del ensayo y no altera significativamente las concentraciones de alcalis en el rango de presiones usuales, aunque su rendimiento disminuye drásticamente en materiales con baja relación a/mc o elevada edad, donde el volumen recuperado puede ser muy pequeño. La CWE ofrece un procedimiento mucho más simple y económico, que solo requiere equipo básico de laboratorio y resulta práctico para estudios rutinarios; sin embargo, introduce errores sistemáticos asociados a la disolución adicional de portlandita, la posible liberación de alcalis fijados y la contribución de los agregados, lo que puede sobreestimar el pH y las concentraciones de Na y K respecto a la SP real. Finalmente, la elución en celda Hassler permite recuperar una fracción mayor del cloruro incorporado en muestras maduras y densas, constituyendo una alternativa valiosa cuando la PWE es poco eficiente, pero su aplicabilidad se ve restringida en hormigones muy impermeables y la saturación previa con agua desionizada tiende a diluir y reequilibrar la SP, comprometiendo la representatividad de las concentraciones medidas [125,123,126].

Una vez extraída la SP, los métodos de medición directa emplean habitualmente una celda de conductividad de vidrio con electrodos de platino, que constituye el enfoque tradicional. En este sistema se utiliza una celda, por lo general cilíndrica, con un diámetro interno del orden de 25 mm y una separación entre electrodos cercana a 320 mm, cuya constante de celda se determina experimentalmente mediante soluciones patrón. Todas las mediciones se realizan en una cámara ambiental mantenida a 25.0 ± 0.4 °C; para ello, la SP se deja en equilibrio térmico durante unas 10 horas en un matraz volumétrico antes de determinar su conductividad con un impedanciómetro [127].

Los métodos para determinar la conductividad de la SP tienen fortalezas y limitaciones complementarias. En los métodos directos, se mide un valor de σp inmediato y con incertidumbre instrumental relativamente baja, aunque sin información detallada sobre la composición individual de los iones y siempre condicionado por el procedimiento previo de extracción. En los métodos indirectos, la conductividad se estima a partir de la composición química de la solución, lo que permite calcular σp con modelos basados en fuerza iónica y conductividades molares, y al mismo tiempo analizar en profundidad la química de la SP; sin embargo, este enfoque requiere equipamiento analítico especializado y depende de parámetros y suposiciones de modelo que introducen incertidumbre adicional frente a la medición directa. [128,127]

1. Los métodos eléctricos se han consolidado como herramientas claves para evaluar la resistencia del hormigón al ingreso de cloruros en ambientes marinos, al ofrecer tiempos de ensayo significativamente menores que los métodos de difusión natural. Sin embargo, su correcta interpretación requiere comprender su relación con la microestructura del hormigón y con la composición iónica de la solución de poros, tal como se establece mediante las ecuaciones de Nernst–Planck y Nernst–Einstein.
2. Los ensayos de difusión natural (ASTM C1543, NT BUILD 443, ASTM C1556) continúan siendo los métodos de referencia para determinar coeficientes de difusión aparente y concentraciones superficiales de cloruros, al reproducir fielmente las condiciones de exposición. No obstante, sus elevados tiempos de ensayo, el consumo de muestras y la complejidad del análisis limitan su uso en el control de calidad rutinario, por lo que resultan más apropiados como métodos patrón para la calibración de técnicas aceleradas.
3. Entre los métodos eléctricos de migración, la ASTM C1202 proporciona un índice rápido de conductividad global, útil para clasificar mezclas, pero no mide directamente la difusión de cloruros y es altamente sensible al contenido de álcalis y al calentamiento de la probeta. Ensayos basados en la migración controlada de cloruros, como NT BUILD 355, SIMCO® y NT BUILD 492, permiten obtener coeficientes de transporte cuantitativos (en régimen estacionario o no estacionario), reduciendo tiempos respecto a la difusión natural, aunque introducen condiciones de ensayo alejadas del servicio y requieren una interpretación más sofisticada.
4. El factor de formación emerge como una alternativa particularmente útil para vincular mediciones eléctricas instantáneas con el coeficiente de difusión efectivo de cloruros. A partir de la relación de Nernst–Einstein, la combinación de la resistividad del hormigón con la conductividad estimada de la solución de poros permite calcular factores de formación que encapsulan, en un único parámetro, los efectos de porosidad conectada, tortuosidad y constricción. Estos factores pueden emplearse para estimar coeficientes de difusión efectivos sin necesidad de ensayos de larga duración, siempre que se disponga de una calibración adecuada frente a métodos de referencia de difusión natural para la familia de hormigones estudiada.
5. La resistividad eléctrica, medida mediante métodos superficiales (sonda Wenner) o volumétricos (configuración uniaxial ASTM C1876 / AASHTO TP 119), constituye un parámetro global muy sensible a la porosidad conectada, a la saturación y a la conductividad de la solución de poros, y se ha demostrado su correlación con los coeficientes de difusión y migración.
6. Los métodos de extracción de solución de poros —expresión mecánica (PWE), extracción con agua fría (CWE) y elución mediante celda Hassler— son complementarios a las técnicas eléctricas, ya que permiten cuantificar directamente la composición iónica y la alcalinidad de la solución de poros, así como validar las hipótesis asumidas en los modelos de transporte.
7. Las correlaciones empíricas entre carga RCPT, coeficientes de migración y resistividad eléctrica muestran tendencias claras —mayor conductividad implica mayor transporte de cloruros—, pero presentan una dispersión importante ligada al tipo de cemento, la presencia de materiales cementantes suplementarios, la edad y la capacidad de fijación de cloruros. Los factores de conversión entre difusión natural y migración acelerada deben calibrarse para cada familia de hormigones y utilizarse con cautela si se pretende extrapolar resultados a condiciones reales de servicio.
8. Para la evaluación de la resistencia a cloruros de hormigones modernos —en particular aquellos con cementos compuestos o con adiciones puzolánicas—, se recomienda adoptar un enfoque combinado que integre: (i) ensayos de difusión natural representativos, (ii) métodos de migración acelerada debidamente calibrados, (iii) mediciones de resistividad superficial y volumétrica, y (iv) caracterización de la solución de poros. Esta estrategia multimodo permite reducir la incertidumbre asociada a cada técnica individual y proporciona una base más robusta para la modelación de la vida útil en ambientes marinos.

1. **Petrova, V.**, "Innovations in Cement Production: The Road to Sustainability and A Circular Economy", *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, Vol.29, pp.295-303, (2024). <https://doi.org/10.55549/epstem.1573538>
2. **Peifeng, S., Qingli, D. and Evan, S.K.**, "Predicting chloride ingress in concrete containing different SCMs based on chloride binding and electrical resistivity", *Construction and Building Materials*, Vol.414, pp.134928, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134928>
3. **Fan, Z. et al.**, "Transfer Parameter Analysis of Chloride Ingress into Concrete Based on Long-Term Exposure Tests in China's Coastal Region", *Materials*, Vol.15, pp.8517, (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15238517>
4. **Ju, X., Wu, L., Liu, M., Jiang, H. and Zhang, W.**, "Modelling of Chloride Concentration Profiles in Concrete by the Consideration of Concrete Material Factors under Marine Tidal Environment", *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol.10, pp.917, (2022). <https://doi.org/10.3390/jmse10070917>
5. **Ukpata, J.O., Ogirigbo, O.R. and Black, L.**, "Resistance of concretes to external chlorides in the presence and absence of sulphates: a review", *Applied Sciences*, Vol.13, pp.182, (2022). <https://doi.org/10.3390/app13010182>
6. **Tuutti, K.**, "Corrosion of steel in concrete", (1982). <http://www.cbi.se/viewNavMenu.do?menuID=317&oid=857>
7. **Tang, L., Nilsson, L.-O. and Basheer, P.M.** *Resistance of concrete to chloride ingress: Testing and modelling*. Taylor & Francis Group., Boca Raton, FL , USA, (2011). <https://doi.org/10.1201/b12603>.
8. **Li, C.-z., Song, X.-b. and Jiang, L.**, "A time-dependent chloride diffusion model for predicting initial corrosion time of reinforced concrete with slag addition", *Cement and Concrete Research*, Vol.145, pp.106455, (2021). <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2021.106455>
9. **Fenau, M.**, "Modelling of chloride transport in non-saturated concrete: from microscale to macroscale", presented at VIII International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures (FraMCoS 8), in the USA, (2013), <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.15285>.
10. **Zhang, Y.**, "Non-saturated Chloride Diffusion in Sustainable Cementitious Materials", presented at Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, in the Netherlands, (2018), <https://doi.org/10.4233/UUID:C3CD9297-6D49-4ED6-8979-22419B98622F>.
11. **Wan, X., Cui, Y., Jin, Z. and Gao, L.**, "Chloride Transport and Related Influencing Factors of Alkali-Activated Materials: A Review.", *Materials*, Vol.16, pp.3979, (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16113979>
12. **Samson, E., Marchand, J. and Snyder, K.A.**, "Calculation of ionic diffusion coefficients on the basis of migration test results", *Materials and Structures*, Vol.36, pp.156-165, (2003). <https://doi.org/10.1007/BF02479554>
13. **Xu, Z. and Ye, G.**, "Understanding chloride diffusion coefficient in cementitious materials", *Materials*, Vol.16, pp.3464, (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16093464>
14. **de Jesus, W.S. et al.**, "Comparative study of ASTM C1202 and IBRACON/NT Build 492 testing methods for assessing chloride ion penetration in concretes using different types of cement", *Buildings*, Vol.15, pp.302, (2025). <https://doi.org/10.3390/buildings15030302>
15. **Higuera-Flórez, C., Lizarazo-Marriaga, J., Oviedo, J., Bustos, M. and Zea, H.**, "Pore solution electrical conductivity estimations in Portland cement pastes: experimental and theoretical insights", *Materials and Structures*, Vol.58, pp.349, (2025). <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02833-4>
16. **Abd El Fattah, A. et al.**, "Field validation of concrete transport property measurement methods", *Materials*, Vol.13, pp.1166, (2020). <https://doi.org/10.3390/MA13051166>
17. **Chidiac, S.E. and Shafikhani, M.**, "Electrical resistivity model for quantifying concrete chloride diffusion coefficient", *Cement and Concrete Composites*, Vol.113, pp.707, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103707>
18. **Suryanto, B., Kim, J., McCarter, W.J., Starrs, G. and Aitken, M.**, "Assessing the Performance and Transport Properties of Concrete using Electrical Property Measurements", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.18, pp.437-455, (2020). <https://doi.org/10.3151/jact.18.437>
19. **Shittu, R., Alfantazi, A., Alkaabi, A. and Kim, T.-Y.**, "Effect of Blending Silica Fume and GGBS on Chloride Penetration in Concrete under Temperature Gradient Conditions", *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Vol.19, pp.796, (2025). <https://doi.org/10.1186/s40069-025-00796-y>
20. **Samson, E. and Marchand, J.**, "Modeling the transport of ions in unsaturated cement-based materials", *Computers & Structures*, Vol.85, pp.1740-1756, (2007). <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2007.04.008>
21. **Wang, X. et al.**, "Chloride Binding and Its Effects on Microstructure of Cement-based Materials", *Journal of The Chinese Ceramic Society*, Vol.41, (2013). <https://doi.org/10.7521/j.issn.0454-5648.2013.02.11>

22. **Jafari Azad, V., Erbehtas, A.R., Qiao, C., Isgor, O.B. and Weiss, W.J.**, "Relating the formation factor and chloride binding parameters to the apparent chloride diffusion coefficient of concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.31, pp.04018392, (2019). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002615](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002615).
23. **Johannesson, B.**, "Development of a Generalized Version of the Poisson–Nernst–Planck Equations Using the Hybrid Mixture Theory: Presentation of 2D Numerical Examples", *Transport in Porous Media*, Vol.85, pp.565-592, (2010). <https://doi.org/10.1007/s11242-010-9578-8>
24. **David, R., Jeffrey, J.T., Bruce, J.C. and Hamlin, M.J.**, "Solubility behavior of Ca-, S-, Al-, and Si-bearing solid phases in Portland cement pore solutions as a function of hydration time", *Cement and Concrete Research*, Vol.32, pp.1663-1671, (2002). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00855-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00855-4)
25. **Barbara, L. and Frank, W.**, "Thermodynamic modelling of the hydration of Portland cement", *Cement and Concrete Research*, Vol.36, pp.209-226, (2006). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.001>
26. **Dale, P.B. et al.**, "Modeling of the influence of transverse cracking on chloride penetration into concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol.38, pp.65-74, (2013). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.003>
27. **Edward, J.G.**, "Permeability, diffusivity, and microstructural parameters: A critical review", *Cement and Concrete Research*, Vol.20, pp.591-601, (1990). [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(90\)90101-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(90)90101-3)
28. **Aligizaki, K.**, "Pore Structure of Cement-Based Materials: Testing, Interpretation, and Requirements", (2005). <https://www.researchgate.net/publication/288893842>
29. **Clennell, M.**, "Tortuosity: A guide through the maze", *Geological Society, London, Special Publications*, Vol.122, pp.299-344, (1997). <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1997.122.01.18>
30. **Promentilla, M.A.B., Sugiyama, T., Hitomi, T. and Takeda, N.**, "Quantification of tortuosity in hardened cement pastes using synchrotron-based X-ray computed microtomography", *Cement and Concrete Research*, Vol.39, pp.548-557, (2009). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.03.005>
31. **Ye, G.**, "Experimental Study and Numerical Simulation of the Development of the Microstructure and Permeability of Cementitious Materials", (2003). <https://resolver.tudelft.nl/uuid:ed9166f3-dc6e-4c6c-bd06-8d43c6354558>
32. **Vogel, H.J. and Roth, K.**, "Quantitative morphology and network representation of soil pore structure", *Advances in Water Resources*, Vol.24, pp.233-242, (2001). [https://doi.org/10.1016/S0309-1708\(00\)00055-5](https://doi.org/10.1016/S0309-1708(00)00055-5)
33. **Katz, A.J. and Thompson, A.H.**, "Prediction of rock electrical conductivity from mercury injection measurements", *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol.92, pp.599-607, (1987). <https://doi.org/10.1029/JB092iB01p00599>
34. **Sébastien, D. et al.**, "On the relationship between superplasticizer demand and specific surface area of calcined clays in LC3 systems", *Construction and Building Materials*, Vol.411, pp.134467, (2024). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134467>
35. **DULLIEN, F.A.L.** *Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure*, ED-Second, Academic Press, San Diego, CA, (1991). <https://doi.org/10.1016/C2009-0-26184-8>.
36. **Marry, V., Rotenberg, B. and Turq, P.**, "Structure and dynamics of water at a clay surface from molecular dynamics simulation", *Physical chemistry chemical physics : PCCP*, Vol.10, pp.4802-4813, (2008). <https://doi.org/10.1039/b807288d>
37. **Korb, J.P., Monteilhet, L., McDonald, P.J. and Mitchell, J.**, "Microstructure and texture of hydrated cement-based materials: A proton field cycling relaxometry approach", *Cement and Concrete Research*, Vol.37, pp.295-302, (2007). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.08.002>
38. **Boubitsas, D. and Tang, L.**, "The influence of reinforcement steel surface condition on initiation of chloride induced corrosion", *Materials and Structures*, Vol.48, (2014). <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0343-2>
39. **Friedmann, H., Amiri, O., Ait-Mokhtar, A. and Dumargue, P.**, "A direct method for determining chloride diffusion coefficient by using migration test", *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.1967-1973, (2004). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.01.009>
40. **Zibara, H., Hooton, R.D., Thomas, M.D.A. and Stanish, K.**, "Influence of the C/S and C/A ratios of hydration products on the chloride ion binding capacity of lime-SF and lime-MK mixtures", *Cement and Concrete Research*, Vol.38, pp.422-426, (2008). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.024>
41. **Elakneswaran, Y., Nawa, T. and Kurumisawa, K.**, "Electrokinetic potential of hydrated cement in relation to adsorption of chlorides", *Cement and Concrete Research*, Vol.39, pp.340-344, (2009). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.01.006>
42. **Birnin-Yauri, U. and Glasser, F.**, "Friedel's salt, Ca₂Al(OH)₆(Cl,OH)·2H₂O: Its solid solutions and their role in chloride binding", *Cement and Concrete Research*, Vol.28, (1998). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00162-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00162-8)

43. Magdalena, B., Barbara, L., Gwenn and Fredrik, P.G., "Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems", *Cement and Concrete Research*, Vol.40, pp.1009-1022, (2010). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.03.002>
44. Andrade, C., "Calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from ionic migration measurements", *Cement and Concrete Research*, Vol.23, pp.724-742, (1993). [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90023-3)
45. Mangat, P.S. and Molloy, B.T., "Prediction of long term chloride concentration in concrete", *Materials and Structures*, Vol.27, pp.338-346, (1994). <https://doi.org/10.1007/BF02473426>
46. Castellote, M., Andrade, C. and Alonso, C., "Measurement of the steady and non-steady-state chloride diffusion coefficients in a migration test by means of monitoring the conductivity in the anolyte chamber. Comparison with natural diffusion tests", *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp.1411-1420, (2001). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00562-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00562-2)
47. Noushini, A., Nguyen, Q.D. and Castel, A., "Assessing alkali-activated concrete performance in chloride environments using NT Build 492", *Materials and Structures*, Vol.54, pp.57, (2021). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01652-7>
48. Jdrzejewska, A., Kanavaris, F., Azenha, M., Benboudjema, F. and Schlicke, D., "Correlation Between Chloride Ions' Migration and Diffusion Coefficients of Alkali-Activated Concrete", presented at International RILEM Conference on Synergising Expertise, in the (2023), https://doi.org/10.1007/978-3-031-33187-9_112
49. Christensen, B.J., Mason, T.O., Jennings, H.M., Bentz, D.P. and Garboczi, E.J., "Experimental and Computer Simulation Results for the Electrical Conductivity of Portland Cement Paste", *MRS Online Proceedings Library*, Vol.245, pp.259-264, (1991). <https://doi.org/10.1557/PROC-245-259>
50. Andrade, C. and Sanjuán, M., "Experimental procedure for the calculation of chloride diffusion coefficients in concrete from migration tests", *Advances in Cement Research*, Vol.6, pp.127-134, (1994). <https://doi.org/10.1680/adcr.1994.6.23.127>
51. Hornakova, M., Konecny, P., Lehner, P. and Katzer, J., "Durability of structural lightweight waste aggregate concrete—electrical resistivity", *MATEC Web of Conferences*, (2020). <https://doi.org/10.1051/MATECONF/202031000015>
52. Rob, B.P., "Test methods for on site measurement of resistivity of concrete — a RILEM TC-154 technical recommendation", *Construction and Building Materials*, Vol.15, pp.125-131, (2001). [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(00\)00061-1](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00061-1)
53. Romain, R., Stéphane, G., Julien, G., Ioannis, I. and Stéphanie, B., "Reinforced concrete structures: A review of corrosion mechanisms and advances in electrical methods for corrosion monitoring", *Construction and Building Materials*, Vol.269, pp.121240, (2021). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121240>
54. Glover, P., "Archie's Law – A reappraisal", *Solid Earth Discussions*, pp.1-18, (2016). <https://doi.org/10.5194/se-2016-47>
55. Snyder, K., "The Relationship Between the Formation Factor and the Diffusion Coefficient of Porous Materials Saturated with Concentrated Electrolytes: Theoretical and Experimental Considerations", *Concr. Sci. Eng.*, Vol.3, (2010). https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860304
56. Baten, B. and Manzur, T., "Formation Factor Concept for Non-Destructive Evaluation of Concrete's chloride diffusion coefficients", *Cement and Concrete Composites*, Vol.128, pp.104440, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104440>
57. Robert, S., Chunyu, Q., Timothy, B. and Jason, W. *Assessing a concrete's resistance to chloride ion ingress using the formation factor*, ED-Second Edition, Woodhead Publishing (2023). <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-381-2.00011-0>
58. McCarter, W.J., Starrs, G. and Chrisp, T.M., "Electrical conductivity, diffusion, and permeability of Portland cement-based mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol.30, pp.1395-1400, (2000). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00281-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00281-7)
59. Garboczi, E.J. and Bentz, D.P., "Computer simulation of the diffusivity of cement-based materials", *Journal of materials science*, Vol.27, pp.2083-2092, (1992). <https://doi.org/10.1007/BF01117921>
60. Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. *Multi-scale modeling of structural concrete*, (2009). <https://doi.org/978-0-415-46554-0>
61. Page, C.L., Short, N.R. and A, "Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes", *Cement and Concrete Research*, Vol.11, pp.395-406, (1981). [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(81\)90111-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(81)90111-3)
62. Snyder, K.A., Feng, X., Keen, B.D. and Mason, T.O., "Estimating the electrical conductivity of cement paste pore solutions from OH⁻, K⁺ and Na⁺ concentrations", *Cement and Concrete Research*, Vol.33, pp.793-798, (2003). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)01068-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)01068-2)

63. **Duy Thanh, L. et al.**, "A physically-based model for the electrical conductivity of partially saturated porous media", *Geophysical Journal International*, Vol.223, (2020). <https://doi.org/10.1093/GJI/GGZ328>
64. **Thomas, M.D.A., Hooton, R.D., Scott, A. and Zibara, H.**, "The effect of supplementary cementitious materials on chloride binding in hardened cement paste", *Cement and Concrete Research*, Vol.42, pp.1-7, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.001>
65. **Ichikawa, T., Haga, K. and Yamada, K.**, "Physicochemical Analysis of Chloride Diffusion and Adsorption in Water-saturated Concrete: Theory and Measurement", *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol.21, pp.218-233, (2023). <https://doi.org/10.3151/jact.21.218>
66. **Zofia, S. and Bulinski, Z.**, "Application of inverse methodology to estimation of chloride diffusion coefficient in concrete of prestressed precast slab", *MATEC Web of Conferences*, Vol.174, pp.01008, (2018). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817401008>
67. **Xu, A. and Shayan, A.**, "Determination of chloride diffusion coefficient of concrete: comparison of bulk diffusion and electrical field method", *Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition.*, Vol.30(4), pp.770-775, (2015). <https://trid.trb.org/View/1394975>
68. **Davis, P.**, "Evaluation of Chloride Diffusion in Concrete Using Bulk Diffusion Test and Scanning Electron Microscopy", (2025), Available from: <https://commons.erau.edu/edt/890>.
69. **Elfmakova, V., Spiesz, P. and Brouwers, H.J.H.**, "Determination of the chloride diffusion coefficient in blended cement mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol.78, pp.190-199, (2015). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.06.014>
70. **ASTM**, (2002), "ASTM C 1543. Standard Test Method for Determining the Penetration of Chloride Ion into Concrete by Ponding", Available from: <https://www.astm.org/c1543-02.html>.
71. **NORDTEST, E., Finland.**, (1995), "NT BUILD 443. CONCRETE, HARDENED: ACCELERATED CHLORIDE PENETRATION", Available from: <https://www.nordtest.info/wp/nt-build-443-concrete-hardened-accelerated-chloride-penetration>.
72. **ASTM**, (2016), "ASTM C1556. Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion", Available from: <https://www.astm.org/c1556-16a.html>.
73. **Maes, M., Gruyaert, E. and De Belie, N.**, "Resistance of concrete with blast-furnace slag against chlorides, investigated by comparing chloride profiles after migration and diffusion", *Materials and Structures*, Vol.46, pp.89-103, (2013). <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9885-3>
74. **Obla, K., Lobo, C. and Kim, H.**, "Tests and Criteria for Concrete Resistant to Chloride Ion Penetration", *ACI Materials Journal*, Vol.113, (2016). <https://doi.org/10.14359/51689107>
75. **Petr Lehner, L.K.M.R.**, "Study of Effect of Reference Time of Chloride Diffusion Coefficient in Numerical Modelling of Durability of Concrete", *Buildings*, Vol.12(9), pp.1443 (2022). <https://doi.org/10.3390/buildings12091443>
76. **Stanish, K., Hooton, D. and Thomas, M.**, "Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review", (1997). <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/19778>
77. **Gergely, J., Bledsoe, J.E., Tempest, B.Q. and Szabo, I.F.**, "Concrete diffusion coefficients and existing chloride exposure in North Carolina", North Carolina Department of Transportation, (2006). Available from: <https://connect.ncdot.gov/projects/research/RNAProjDocs/2004-12FinalReport.pdf>.
78. **LANE, D.S.**, "Laboratory comparison of several tests", pp.16, (2004). https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/19778/dot_19778_DS1.pdf
79. **Harshit, A. and Salman, M.**, "Chloride diffusion modeling and residual service life estimation of binary blended reinforced concrete in bridges: Using resistivity measurements and non-linear binding parameters", *Structures*, Vol.86, pp.111385, (2026). <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2026.111385>
80. **Presuel, F., Liu, Y. and Paredes, M.**, "Understanding the Effect of Rebar Presence And/or Multilayered Concrete Resistivity on the Apparent Surface Resistivity Measured via the Four-Point Wenner Method", presented at in the (2009), <https://doi.org/10.5006/C2009-09217>.
81. **Salehi, M., Ghods, P. and Isgor, O.**, "Numerical investigation of the role of embedded reinforcement mesh on electrical resistivity measurements of concrete using the Wenner probe technique", *Materials and Structures*, Vol.49, (2014). <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0498-x>
82. **MILLARD, S.G. and GOWERS, K.R.**, "RESISTIVITY ASSESSMENT OF IN-SITU CONCRETE: THE INFLUENCE OF CONDUCTIVE AND RESISTIVE SURFACE LAYERS", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, Vol.94, pp.389-396, (1992). <https://doi.org/10.1680/istbu.1992.21502>
83. **Candelaria, M.D.E., Kee, S.-H. and Lee, K.-S.**, "Prediction of Compressive Strength of Partially Saturated Concrete Using Machine Learning Methods", *Materials*, Vol.15, pp.1662, (2022). <https://doi.org/10.3390/ma15051662>
84. **ASTM**, (2019), "1202- Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration.", Available from: <https://www.astm.org/c1202-19.html>.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

85. **Caijun, S.**, "Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results", *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.537-545, (2004). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.007>
86. **Bognacki, C.J., Cramer, S. M., & McDonald, D. B.**, "Rapid chloride permeability testing", *Concrete international*, Vol.32(7), pp.31-36, (2010).
87. **Bentz, D.**, "A virtual rapid chloride permeability test", *Cement and Concrete Composites*, Vol.29, pp.723-731, (2007). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.06.006>
88. **Bassuoni, M., Nehdi, M. and Greenough, T.**, "Enhancing the Reliability of Evaluating Chloride Ingress in Concrete Using the ASTM C 1202 Rapid Chloride Penetrability Test", *Journal of ASTM International*, Vol.3, (2006). <https://doi.org/10.1520/JAI13403>
89. **Salvador, M.**, "Effect of accelerated curing on surface resistivity and rapid chloride permeability of high performance concrete", *Rutgers The State University of New Jersey, School of Graduate Studies*, (2013). <https://doi.org/doi:10.7282/T3KS6Q42>
90. **Tang, L.**, "Electrically accelerated methods for determining chloride diffusivity in concrete—current development", *Magazine of Concrete Research*, Vol.48, pp.173-179, (1996). <https://doi.org/10.1680/mac.1996.48.176.173>
91. **R. S. Barneyback, J.a.S.D.** *EXPRESSION AND ANALYSIS OF PORE FLUIDS FROM HARDENED CEMENT PASTES AND MORTARS*, (1981). <https://www.osti.gov/biblio/6901477>.
92. **NORDTEST, E., Finland.**, (1999), "NTBUILD 355 Concrete, Mortar and Cement-Based Repair Materials: Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments", Available from: <https://www.nordtest.info/wp/nt-build-355-chloride-migration-coefficient-from-non-steady-state-migration-experiments>.
93. **Concrete, M.**, (2010), "Laboratory Certification Protocol STADIUM", Available from: <https://www.simcotechnologies.com/what-we-do/stadium-technology-portfolio/stadium-lab/>.
94. **Lu, X.**, "Application of the Nernst-Einstein equation to concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol.27, (1997). [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)00200-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)00200-1)
95. **Szweda, Z., Golaszewski, J., Ghosh, P., Lehner, P. and Konečný, P.**, "Comparison of Standardized Methods for Determining the Diffusion Coefficient of Chloride in Concrete with Thermodynamic Model of Migration", *Materials*, Vol.16, pp.637, (2023). <https://doi.org/10.3390/ma16020637>
96. **Antoni, M.**, "Investigation of cement substitution by blends of calcined clays and limestone", Doctor of Science, Faculty of Engineering, Laboratory of Construction Materials, Doctoral Program in Materials Science and Engineering, Federal Polytechnic School of Lausanne, (2013), Available from: <https://doi.org/10.5075/epfl-thesis-6001>.
97. **NORDTEST, E., Finland.**, (1999), "NT BUILD 492 CHLORIDE MIGRATION COEFFICIENT FROM NON-STEADY-STATE MIGRATION EXPERIMENTS", Available from: <https://www.nordtest.info/wp/nt-build-492-chloride-migration-coefficient-from-non-steady-state-migration-experiments>.
98. **Drenkard, H. and Fischer, C.**, "Einblicke zum Rapid Chloride Migration Test – Präzision, Chloridverlauf und Chloridbinden", *Beton- und Stahlbetonbau*, Vol.120, (2025). <https://doi.org/10.1002/best.202500022>
99. **Nicula, L., Corbu, O.C., Iliescu, M. and Hegyi, A.**, "Study on the Durability of Road Concrete with Blast Furnace Slag Affected by the Corrosion Initiated by Chloride", *Advances in Civil Engineering*, Vol.2021, (2021). <https://doi.org/10.1155/2021/8851005>
100. **Junior, F., Wally, G., Teixeira, F. and Magalhães, F.**, "Experimental assessment of accelerated test methods for determining chloride diffusion coefficient in concrete", *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, Vol.14, pp.e14407, (2021). <https://doi.org/10.1590/s1983-41952021000400007>
101. **Yuwei, M. et al.**, "Assessing the long-term chloride resistance of alkali-activated fly ash/slag concrete by natural chloride diffusion test and rapid chloride migration test", *Construction and Building Materials*, Vol.472, pp.140823, (2025). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140823>
102. **Wosniack, L. et al.**, "Resistividade elétrica do concreto pelo ensaio de migração de cloretos: comparação com o método dos quatro eletrodos", *Ambiente Construído*, Vol.21, pp.321-340, (2021). <https://doi.org/10.1590/S1678-86212021000300554>
103. **Drenkard, H. and Fischer, C.**, "Untersuchungen zur Ladungsmessung als Prüfmethode zur Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton", *ce/papers*, Vol.6, pp.1230-1236, (2023). <https://doi.org/10.1002/cepa.2973>
104. **Tang, L. and Nilsson, L.-O.**, "Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electric Field", *Materials*, Vol.89, pp.49-53, (1993). <https://doi.org/10.14359/1244>
105. **Castellote, M. and Andrade, C.**, "Round-Robin Test on Methods for Determining Chloride Transport Parameters in Concrete", *Materials and Structures*, Vol.39, pp.955-990, (2006). <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9193-x>
106. **Spiesz, P. and Brouwers, H.J.H.**, "Influence of the applied voltage on the Rapid Chloride Migration (RCM) test", *Cement and Concrete Research*, Vol.42, pp.1072-1082, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.04.007>

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

107. Vennesland, Ø., Raupach, M. and Andrade, C., "Recommendation of Rilem TC 154-EMC: "Electrochemical techniques for measuring corrosion in concrete"—measurements with embedded probes", *Mater. Struct.*, Vol.40, pp.745-758, (2007). <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9219-4>
108. Officials, A.o.S.H.a.T., (2013), "AASHTO Designation: TP 95-11. Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration ", Available from: <https://store.transportation.org>.
109. AASHTOD, (2021), "TP119-21 Standard Method of Test for Electrical R", Available from: <https://store.transportation.org>.
110. Spragg, R., Castro, J., Nantung, T., Paredes, M. and Weiss, W., "Variability Analysis of the Bulk Resistivity Measured Using Concrete Cylinders", *Advances in Civil Engineering Materials*, Vol.21, (2011). <https://doi.org/10.1520/ACEM104596>
111. Oğulcan, C., Newell, R.W. and Kimberly, E.K., "Relating LC3 microstructure, surface resistivity and compressive strength development", *Cement and Concrete Research*, Vol.160, pp.106920, (2022). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106920>
112. Carmen Andrade Perdrix, M.Á.C.L. Recomendación sobre la medida de la resistividad eléctrica en probetas de hormigón, (2020). <https://doi.org/10.21041/AlconpatInternacional/RecTec/2020-04-resistividadenprobetas>.
113. Feldman, R.F., Chan, G. W., Brousseau, R. J., & Tumidajski, P. J. , "Investigation of the rapid chloride permeability test", *ACI Materials Journal*, Vol.91(3), pp.246-255, (1994). <https://doi.org/10.14359/4330>
114. Kang-Shiun, H. and Chung-Chia, Y., "Using RCPT determine the migration coefficient to assess the durability of concrete", *Construction and Building Materials*, Vol.167, pp.822-830, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.109>
115. Enrique Vivas, H.R.H.I., Andrew J. Boyd, "Permeability of concrete – comparison of conductivity and diffusion methods", University of Florida, (2007). Available from: <https://fdotwww.blob.core.windows.net/sitefinity/docs/default-source/research/reports/fdot-bd536-rpt.pdf>.
116. Stanish, K., Hooton, R.D. and Thomas, M.D., "A Rapid Migration Test for Evaluation of the Chloride Penetration Resistance of High Performance Concrete", (2000). <http://worldcat.org/isbn/0937040657>
117. Nanukuttan, S., Basheer, M. and Robinson, D., "Development of a rapid in situ ion migration test and comparison with the ASTM rapid chloride permeability test", (2010). <https://www.researchgate.net/publication/238739523>
118. Vázquez-Rodríguez, F.J. et al., "Evaluation of Chloride Diffusion and Corrosion Resistance in Reinforced Concrete Using Internal Curing and Shrinkage Reducing Admixtures", *International Journal of Electrochemical Science*, Vol.13, pp.6027-6047, (2018). <https://doi.org/10.20964/2018.06.25>
119. Amin, N., Arnaud, C., James, A. and Aditya, R., "Chloride diffusion resistance and chloride binding capacity of fly ash-based geopolymers concrete", *Cement and Concrete Composites*, Vol.105, pp.103290, (2020). <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.006>
120. Yang, J., Wittmann, F. and Zhao, T., "Comparison of different test methods to determine the diffusion coefficient of chloride in concrete", *Int. J. Restoration of Buildings and Monuments*, Vol.16, pp.57-76, (2010). <https://doi.org/10.1515/rbm-2010-6352>
121. Riding, K., Thomas, M.D.A. and Folliard, K., "Apparent Diffusivity Model for Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials", *AMJ*, Vol.110, pp.705-713, (2013). <https://www.researchgate.net/publication/286535491>
122. Buckley, L.J., Carter, M.A., Wilson, M.A. and Scantlebury, J.D., "Methods of obtaining pore solution from cement pastes and mortars for chloride analysis", *Cement and Concrete Research*, Vol.37, pp.1544-1550, (2007). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.08.009>
123. Maxime, R., Marianne Tange, H. and Ricardo Antonio, B., "Pore solution alkalinity of cement paste as determined by Cold Water Extraction", *Cement*, Vol.11, pp.100055, (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cement.2023.100055>
124. Plusquellec, G., Geiker, M.R., Lindgård, J. and K., "Determining the free alkali metal content in concrete – Case study of an ASR-affected dam", *CCR*, Vol.105, pp.111-125, (2018). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.003>
125. Powers, T.C. and Brownyard, T.L., "Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste", *ACI Journal Proceedings*, Vol.43, pp.103-132, (1946). <https://doi.org/10.1007/978-1-349-03994-4>
126. Naga Pavan, V. and David, T., "Influence of Concrete Mixture Parameters on Chloride Test Measurements", *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol.30, pp.04018188, (2018). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002364](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002364)
127. Skoog, D.A., Holler, F. J. y Crouch, S. R. *Principios de análisis instrumental*, Cengage Learning., (2008). https://www.bluebooksoft.com/TECNOLOGIA_ANALISIS_QUIMICO/2090.pdf.
128. ALCÓCER, A.G., "Modelización termoquímica de la solución de poros en sistemas cemento-agua", Tesis de Magíster, Universidad de Chile, (2007), Available from: https://repositorio.uchile.cl/tesis/uchile/2007/garcia_a/sources/garcia_a.pdf.