



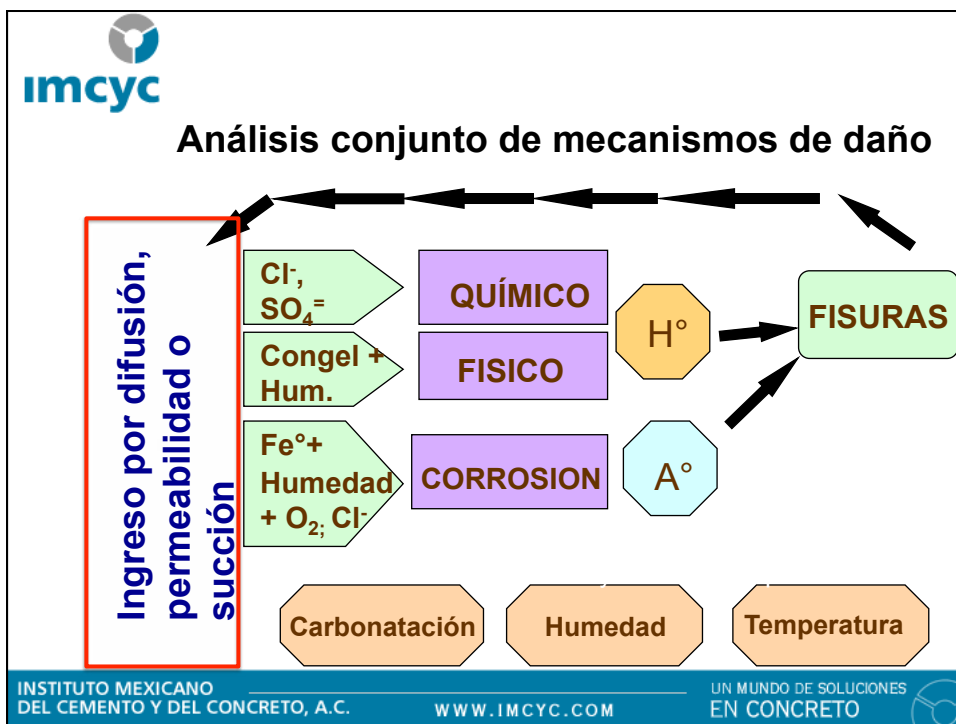
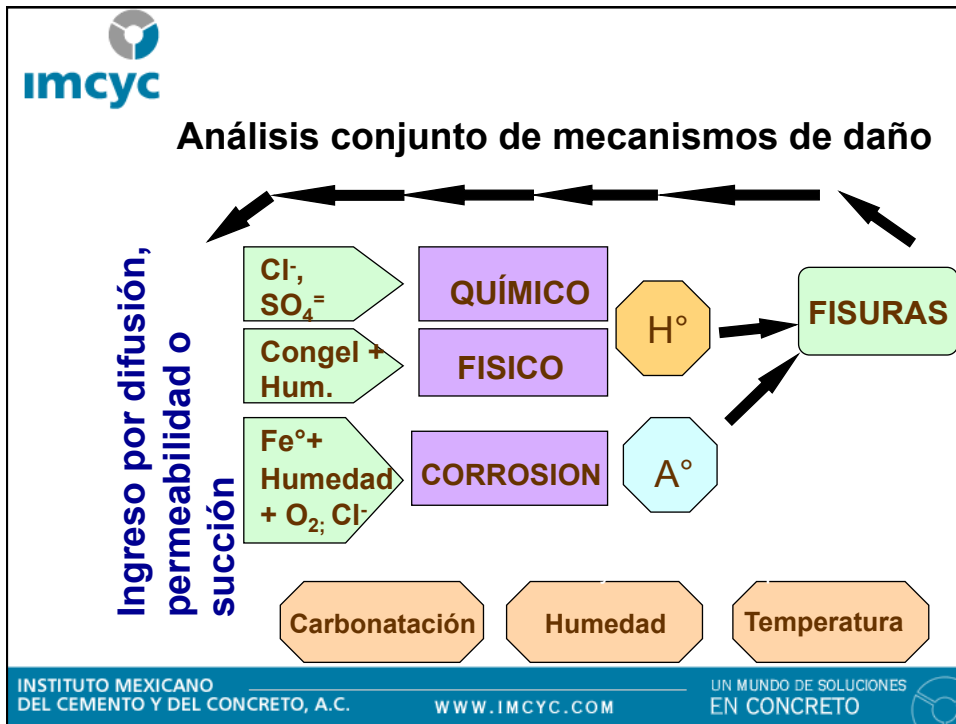
Módulo 4: Mecanismos de transporte de fluidos en un medio poroso

Luis Fernandez Luco
Doctor Ingeniero Civil
Universidad de Buenos Aires



Relación entre durabilidad y capacidad de transporte de fluidos por parte del hormigón







Física del transporte de masa en un medio poroso

Los fenómenos básicos de transporte de fluidos en un medio poroso son

- ➔ el escurrimiento de agua bajo una diferencia de presiones hidrostáticas (el efecto de la succión capilar es un caso particular de este fenómeno)
- ➔ la transferencia neta de masa por una diferencia de concentraciones (que incluye el transporte de iones por el agua).
- ➔ la transferencia de iones por diferencias de potencial eléctrico (que no es frecuente en situaciones reales pero sí se emplea en ensayos acelerados)



Principales Mecanismos de Transporte

Esquema	Mecanismo	Relevante en
	Permeabilidad: Gradiente de Presión a través del elemento	Cisternas y presas que retienen agua u otros fluidos
	Difusión: Gradiente de concentración a través del elemento ($C_1 > C_2$)	Carbonatación y penetración de Cl^- en elementos sumergidos
	Absorción: Presión capilar en la interfase agua/aire	Penetración de agua de lluvia o de Cl^- en zona de mareas (SO_4^{2-} en suelos)
	Electromigración: Movimiento de iones a través de los poros debido a un potencial eléctrico	Migración de iones durante el desarrollo de la corrosión del acero



imcyc

Casos más relevantes de transferencia de fluidos en el hormigón

	Exposición del hormigón	Proceso de transporte
Penetración de sustancias disueltas (cloruros, sulfatos, etc.)	Saturado	Difusión iónica
	Bajo carga hidrostática	Movimiento de agua intersticial – Permeabilidad
	Cara saturada / cara al aire	Efecto mecha
	Mojado y secado	Succión capilar -
Penetración de agua (túneles, sótanos, estructuras de retención de agua, etc.)	Bajo carga hidrostática	Movimiento de agua intersticial – Permeabilidad
	Cara saturada / cara al aire	Efecto mecha
	Cara al aire (húmedo) y cara al aire (seco)	Difusión de vapor
Carbonatación	CO ₂	Difusión + carbonatación

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO

imcyc

Mecanismos acoplados

EFECTO “MECHA”

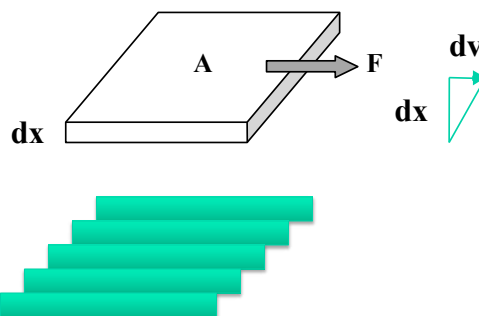
INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO



Escorrimento de agua por efecto de gradiente de presiones

El movimiento de un fluido se origina en fuerzas tangenciales

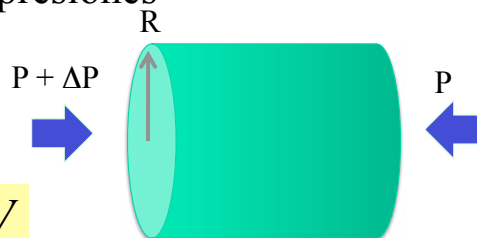
$$F/A = \mu \, dv/dx$$



Movimiento de un fluido por diferencia de presiones


$$F/A = \mu \cdot dv/dy$$

$$\frac{\Delta P \cdot \pi \cdot R^2}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot L} = -\mu \frac{dV}{dR}$$

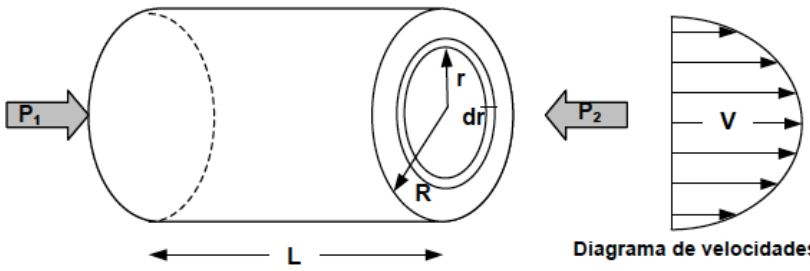


El caudal que pasa por un tubo de radio R se calcula integrando, elementos de velocidad de flujo dV en el dominio de r






Ec. de Hagen – Poiseuille (para fluidos no compresibles)



$$Q = \int v \cdot 2 \pi r \cdot dr = \frac{\pi (p_1 - p_2)}{2 \mu L} \int (R^2 - r^2) \cdot r \cdot dr = \frac{\pi (p_1 - p_2) R^4}{8 \mu L}$$

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO

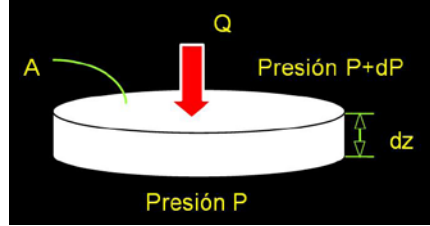


Transporte por escurrimiento hidráulico: permeabilidad


Ley generalizada de Darcy

$$Q = -(K/\mu) \cdot A \cdot dP/dz$$

Ec. Poiseuille

$$Q = \frac{\pi (p_1 - p_2) R^4}{8 \mu L} = \frac{R^2}{8 \mu} \cdot \pi R^2 \cdot \frac{(p_1 - p_2)}{L}$$


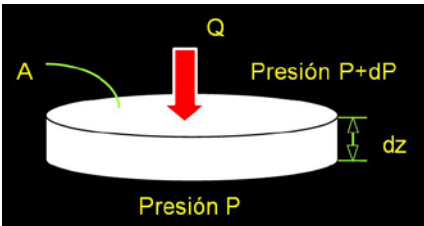
INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO


 Transporte por escurrimiento hidráulico:
permeabilidad


Ley generalizada de Darcy

$$Q = -(K/\mu) \cdot A \cdot dP/dz$$


Ec. Poiseuille


$$Q = \frac{\pi (p_1 - p_2) R^4}{8 \mu L} = \frac{R^2}{8 \mu} \cdot \pi R^2 \cdot \frac{(p_1 - p_2)}{L}$$


INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 

 **Succión capilar**

(Caso específico de permeabilidad en donde la “presión” está originada en las tensiones capilares)

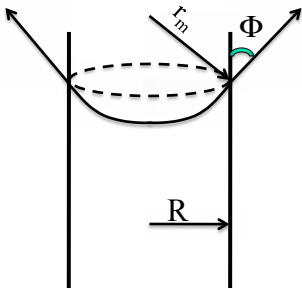
INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 

 **Succión capilar**


Si el transporte de líquido en el material poroso se debe a la tensión capilar (meniscos)


$$Q = -(K/\mu) \cdot A \cdot dP_w/dz \quad \text{y} \quad p_a - p_w = 2\gamma/r_m$$

(Ecuación de Darcy generalizada) (Ec. Laplace)



$$K = R^2/8 \quad R = r_m \cdot \cos\Phi$$

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 

 **Succión capilar**


Si el transporte de líquido en el material poroso se debe a la tensión capilar (meniscos)

$$Q = -(K/\mu) \cdot A \cdot dP_w/dz \quad \text{y} \quad p_a - p_w = 2\gamma/r_m$$

(Ecuación de Darcy generalizada) (Ec. Laplace)

Si consideramos la influencia de la gravedad (para capilares grandes)

$$Q = -\frac{K}{\mu} \cdot A \cdot \frac{\partial}{\partial z} (P_w + \rho gh)$$

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 



Cinética de la succión capilar

Consideremos un capilar horizontal de longitud L

$$Q = -(K/\mu) \cdot A \cdot \Delta P / L \quad \text{y} \quad \Delta p = 2\gamma / r_m$$

Si adoptamos $V = Q/A$ y reemplazando $K = R^2/8$ y $r_m = R/\cos \phi$

$$V = \frac{R^2 \cdot 2\gamma \cos \phi}{8\mu \cdot R \cdot L} = \frac{dl}{dt} \quad \text{integrando}$$

$$L^2/2 = (R/4\mu \cdot \gamma \cos \phi \cdot t)^{1/2} \quad L = S \cdot t^{1/2}$$

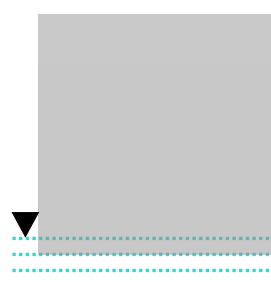
Siendo $S = (R/2\mu \cdot \gamma \cos \phi)^{1/2}$ la capacidad de succión capilar o "sorptivity". Usualmente se ajusta una función

$$L = S \cdot t^{1/2} + S_0$$



Esquema del ensayo

Esquema



Grado de saturación

S_f

S_{24}

S_{50}

Evolución supuesta en el modelo

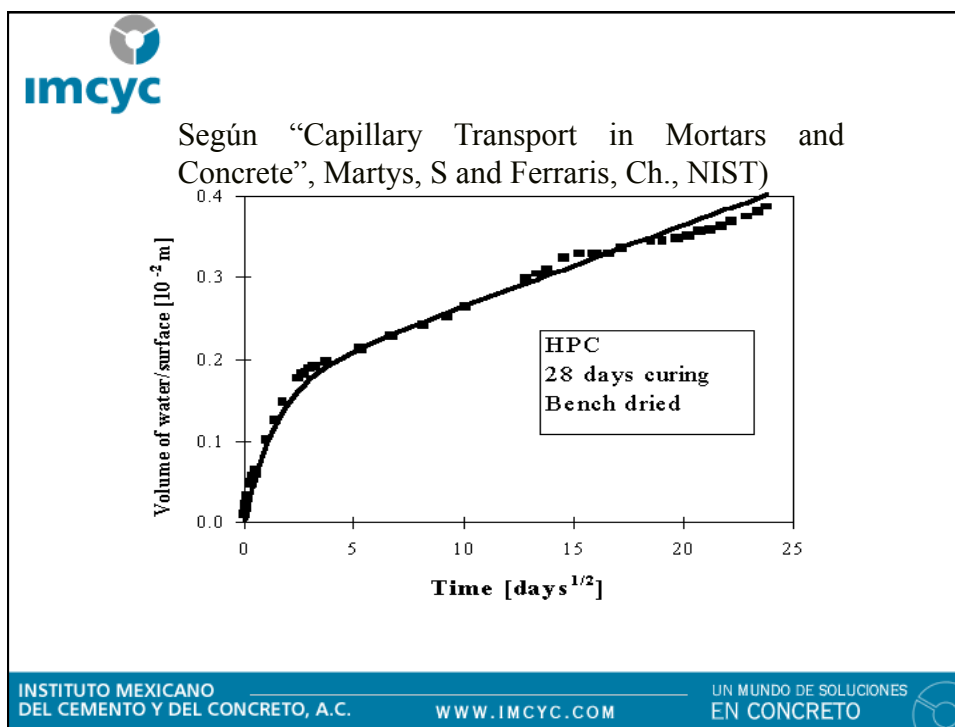
Evolución medida en la probeta

24 hs

(Tiempo)^{0,5}

Aclaración: El gráfico representa altura de agua, por motivos didácticos, aunque se mide ganancia en peso.







Transporte por difusión

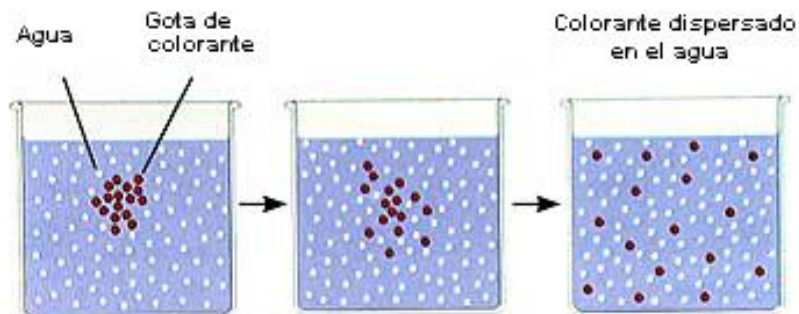
INSTITUTO MEXICANO
DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.

WWW.IMCYC.COM

UN MUNDO DE SOLUCIONES
EN CONCRETO



En situaciones en las que existen gradientes de concentración de una sustancia, o de temperatura, se produce un flujo de partículas o de calor que tiende a homogeneizar la disolución y uniformizar la concentración o la temperatura.




INSTITUTO MEXICANO
DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.

WWW.IMCYC.COM

UN MUNDO DE SOLUCIONES
EN CONCRETO







Expresión general de un proceso de transporte por difusión unidimensional

$$\text{velocidad del proceso de transporte} = \frac{\text{fuerza impulsora}}{\text{resistencia}}$$

$$\text{Flujo}_x = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x}$$

Número de moléculas por unidad de área y unidad de tiempo \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow
 Coef. de Difusion \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow
 Gradiente de concentración

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 




Transporte por difusión

Difusividad aparente D_a

Se define la difusividad aparente “ D_a ” de una especie en un medio poroso (o coeficiente de difusión aparente) con una expresión semejante:

$$J_x = - D_a \cdot dC/dx \quad \text{con } [D_a] = [L^2/t]$$

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 



En los análisis de durabilidad interesa la “cinética” de la reacción, que se puede describir mediante la resolución de la segunda Ley de Fick (conservación de la masa).

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \text{Da} \frac{\partial C(x,t)}{\partial x}$$

$$\frac{\partial C(x,t)}{\partial t} = \text{Da} \cdot \nabla^2 C = \text{Da} \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right)$$

Esta ecuación indica que el cambio de concentración en un punto x es proporcional a la curvatura del perfil de concentraciones $c(x,t)$ respecto a la posición




Una de las posibles soluciones numéricas (si D puede asumirse constante) es:

$$C(x,t) = C_s \left[\text{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{\text{Da} \cdot t}} \right) \right]$$

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-x^2) \cdot dx$$

La solución matemática $C(x,t)$ se puede expresar en función de una variable única $z = x/\sqrt{t}$.




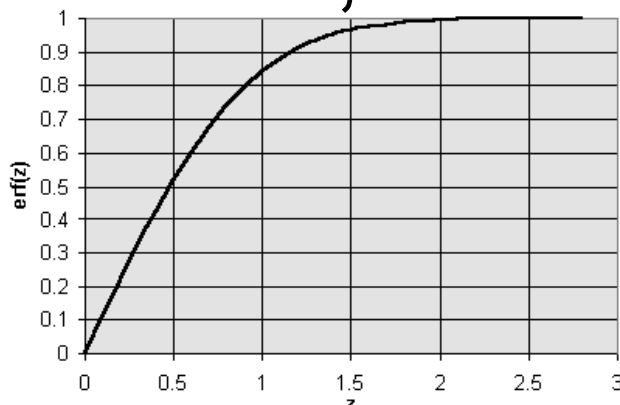
 El avance del frente de carbonatación es un proceso difusivo




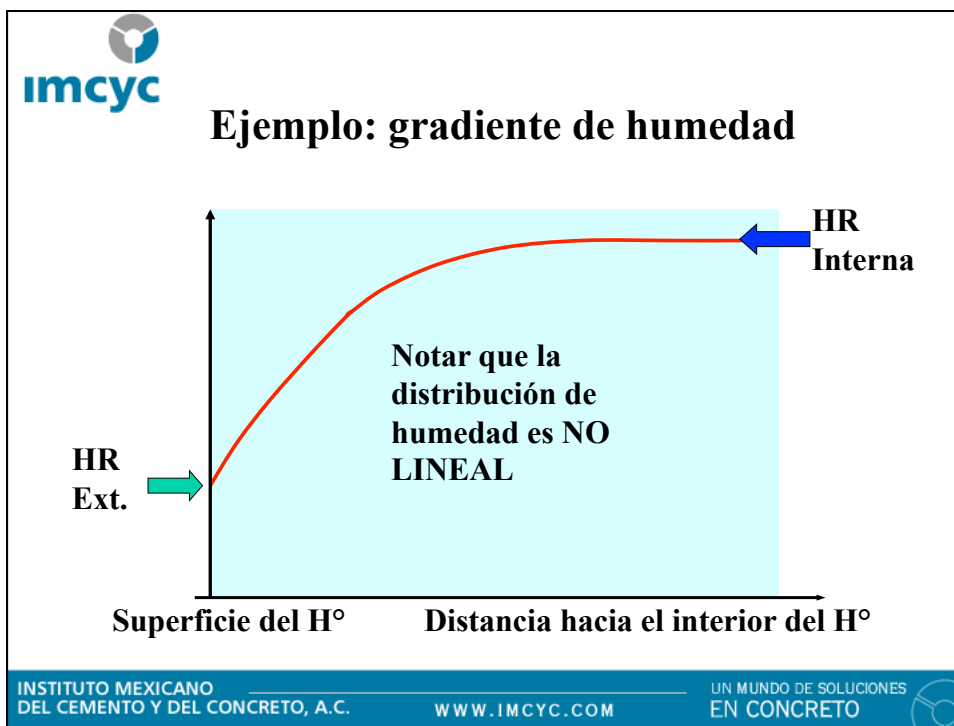
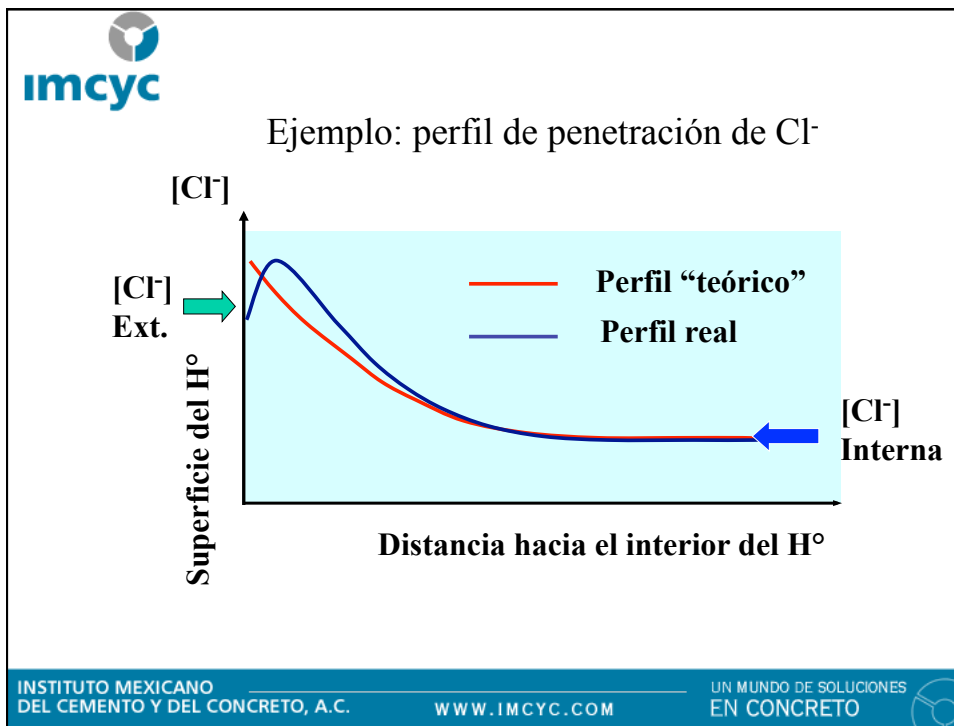
$$X = K \cdot \sqrt{t}$$


INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 

 Representación gráfica de la función error

$$\text{erf}(z) = 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^z \exp(-x^2) \cdot dx$$


INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 

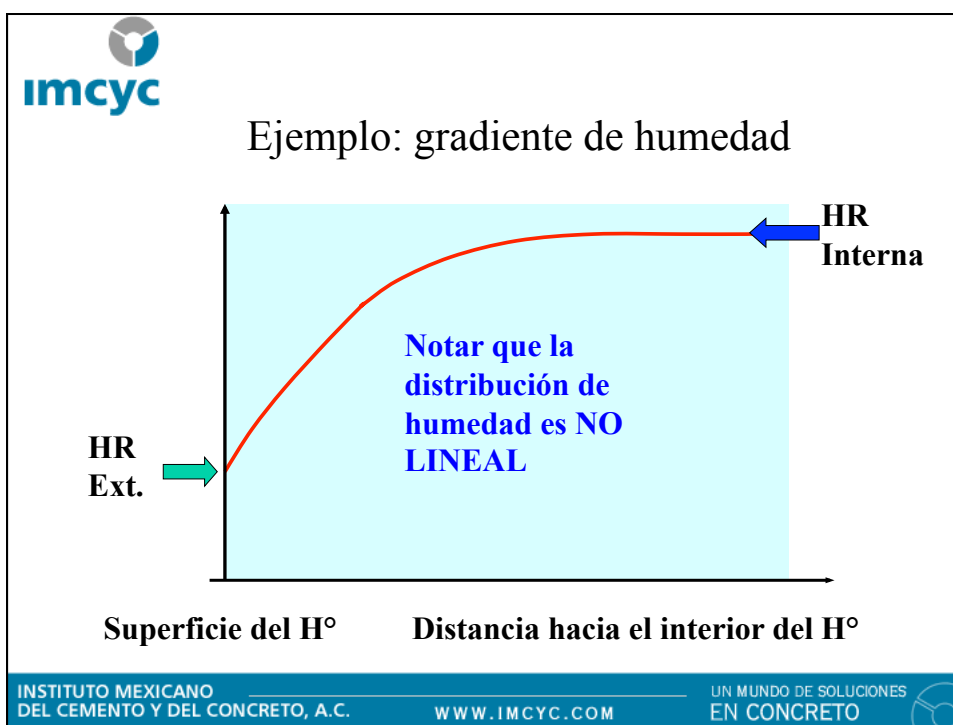





Consecuencia de la aparición de
gradientes en fenómenos difusivos

Secado
Propiedades térmicas

INSTITUTO MEXICANO
DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES
EN CONCRETO

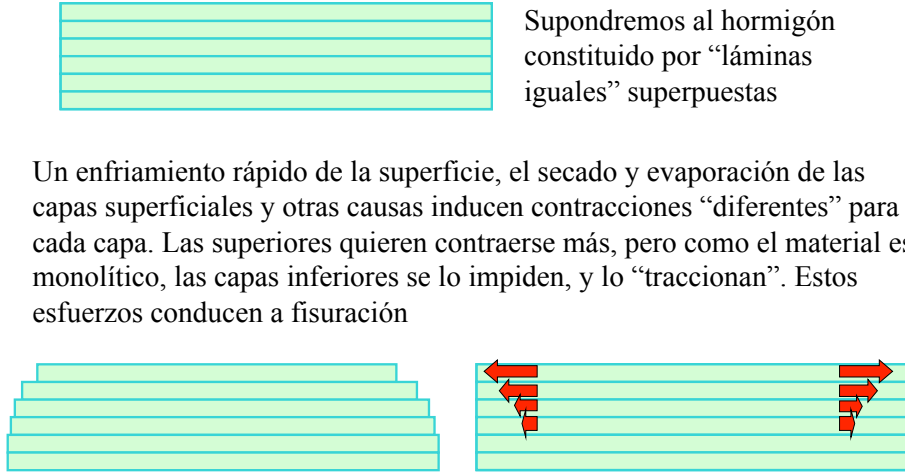





Gradientes de deformación

Supondremos al hormigón constituido por “láminas iguales” superpuestas

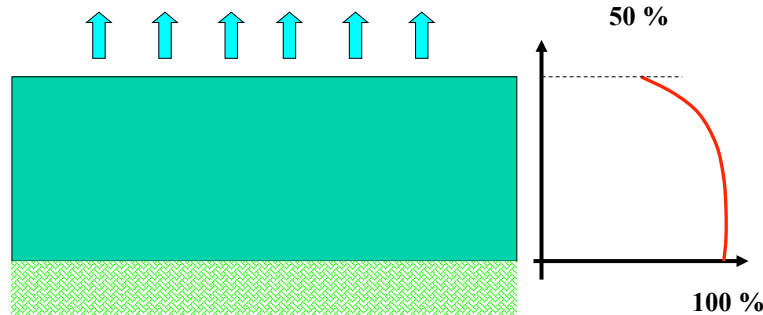
Un enfriamiento rápido de la superficie, el secado y evaporación de las capas superficiales y otras causas inducen contracciones “diferentes” para cada capa. Las superiores quieren contraerse más, pero como el material es monolítico, las capas inferiores se lo impiden, y lo “traccionan”. Estos esfuerzos conducen a fisuración



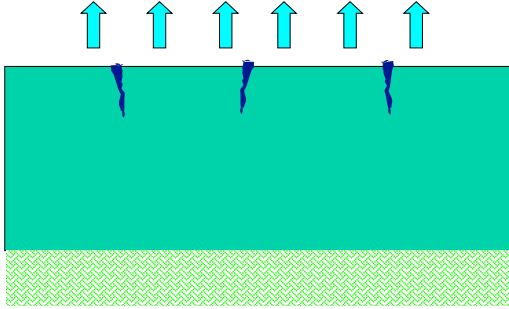
INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO



Gradientes térmicos / por secado



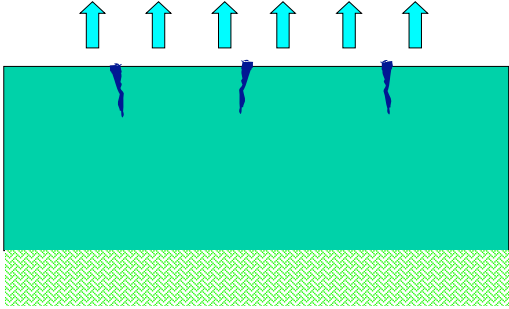
INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO



imcyc

Gradientes térmicos / por secado

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO



imcyc

En cualquier consideración sobre la durabilidad y el mecanismo de ingreso de agresivos en el hormigón debe considerarse la importancia de la fisuración

Su prevención y control forma parte del planteo integral sobre la durabilidad del hormigón estructural

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO



Migración

La fuerza impulsora es una diferencia de potencial eléctrico




Ecuación general

$$J_i = -D_i \left(\frac{\partial C_i}{\partial x} + \frac{z_i F}{RT} c_i \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + cv$$

- Donde
- J = flujo de masa (g/m²s)
 - D = coeficiente de difusión (m²/s)
 - C = concentración (g/m³)
 - x = distancia (m)
 - z = carga eléctrica
 - F = Constante de Faraday (J/V mol)
 - R = Constante universal de los gases (J/mol K)
 - T = temperatura absoluta (K)
 - Φ = potencial eléctrico (V)
 - v = velocidad del flujo capilar (m/s)





Ecuación general (Nernst – Planck)

$$J_i = -D_i \left(\frac{\partial C_i}{\partial x} - \frac{z_i F}{RT} c_i \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + c v$$

↑

Término difusivo

↑

Término de migración


↑

Término de convección

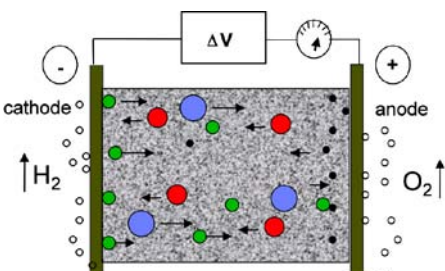
INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.

WWW.IMCYC.COM

UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO



En una celda electrolítica, la carga eléctrica se transporta por diferentes iones



$$D_a = \frac{JRTI}{zFC\gamma \cdot \Delta E}$$

● SO₄²⁻

● OH⁻

● Ca²⁺

● H⁺

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.

WWW.IMCYC.COM

UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO



- La proporción de corriente que transporta un determinado ión respecto del total transportada por todos los iones se conoce como “número de transferencia” de ese ión en ese electrolito en particular.
- En lo que respecta al ión Cloruro, su “número de transferencia” se expresa como sigue:


$$t_{Cl} = \frac{z F J}{i}$$

t_{Cl} = Número de transferencia del Cloruro
 z = Carga eléctrica del ión cloruro
 F = Constante de Faraday (C/eq)
 J = Flujo de cloruros (mol/cm² s)
 i = Densidad total de corriente (A/cm²).






Transporte de materia a escala de poros







Conceptos básicos

Es posible idealizar un esquema simple constituido por tubos de diferente diámetros.

Tubos bloqueados		Nula capacidad de transporte
Mayor diámetro		> capacidad de transporte
Menor diámetro		< capacidad de transporte


“tamaño de poros” y “conectividad”


INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 





La estructura de poros condiciona el transporte de fluidos

- Efecto del tamaño de los poros
 - Radio medio de los poros
 - Curvatura – Efecto Kelvin-Laplace
- Efecto de la conectividad de poros y la tortuosidad


INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 


 Parámetros descriptivos de la porosidad		
Parámetro	Definición	Ecuación
Porosidad	Relación volumétrica entre volumen de vacíos y volumen total (volumen de vacíos + volumen sólido)	$p = \frac{v_p}{v_t} = \frac{v_p}{(v_s + v_p)}$
Tamaño	Diámetro medio de poros (usualmente, se obtiene mediante porosimetría de mercurio)	$d = \frac{4\sigma \cos \phi}{P}$
Conectividad	Relación entre el número de conexiones (b) y el número de cavidades o nodos (n)	$c = b - n + 1$
Tortuosidad	Relación entre la longitud efectiva media de la trayectoria de un fluido (Le) y la dimensión del sólido (L)	$T = \left(\frac{Le}{L}\right)^2$

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 

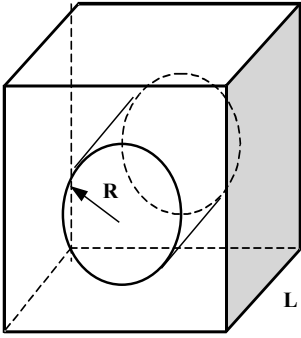
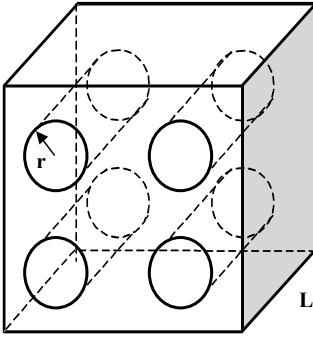


Efecto del tamaño de poros sobre la permeabilidad y difusión

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 




Modelo de poros cilíndricos

Para mantener la porosidad, $r = R / \sqrt{N}$

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.
WWW.IMCYC.COM
UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO



Efectos del tamaño de poros sobre las propiedades de transporte

	Caso 2a	Caso 2b
Porosidad (ϕ)	$\pi R^2/L^2$	$N \pi (R^2)/N L^2 = \pi R^2/L^2$
Permeabilidad (k)	$\pi R^4/(8L^2)$	$N \pi (R^4 / [N^2 \cdot (8L^2)]) = 1/N [\pi R^4/(8L^2)]$
Difusividad iónica (D)	$Do \pi R^2/L^2$	$N Do \pi R^2 / N L^2 = Do \pi R^2/L^2$

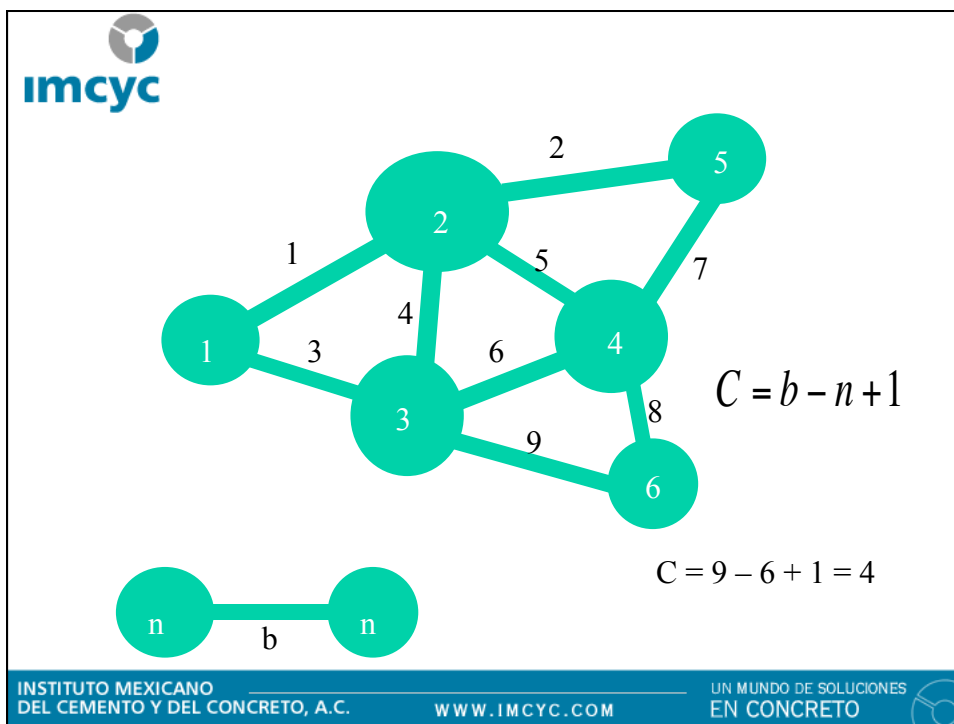
Si se mantiene la misma porosidad, es decir, se verifica la relación $r = R/\sqrt{N}$, la permeabilidad se reduce en un factor N, en tanto la difusividad iónica no cambia.
Pero ambas propiedades dependen de la conectividad de los poros.

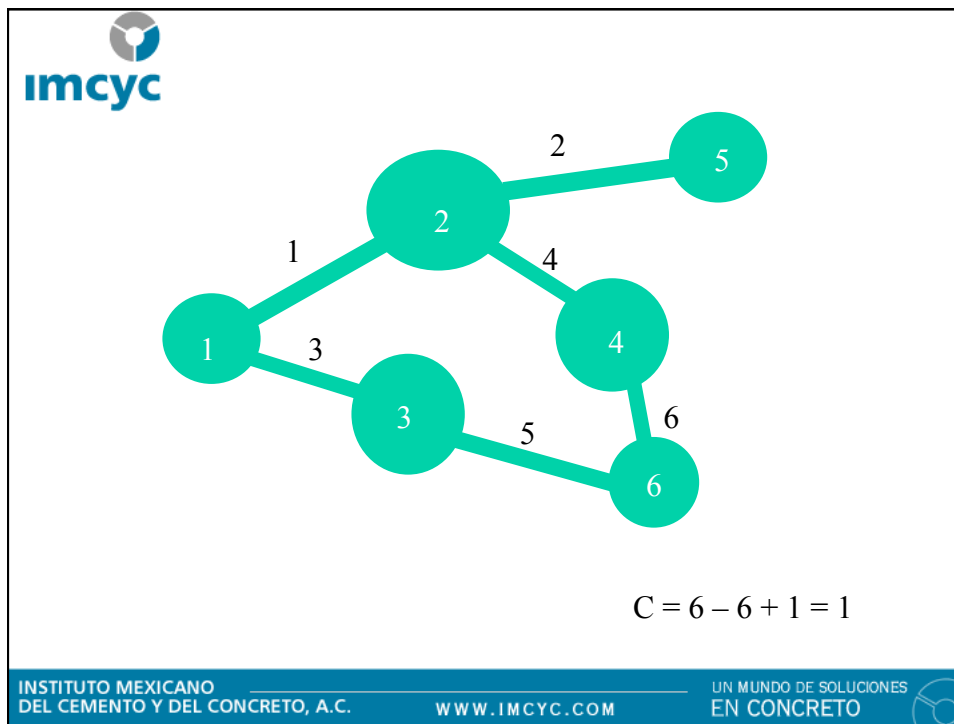
INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.
WWW.IMCYC.COM
UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO

imcyc **Parámetros descriptivos de la porosidad**

Parámetro	Definición	Ecuación
Porosidad	Relación volumétrica entre volumen de vacíos y volumen total (volumen de vacíos + volumen sólido)	$p = \frac{v_p}{v_t} = \frac{v_p}{(v_s + v_p)}$
Tamaño	Diámetro medio de poros (usualmente, se obtiene mediante porosimetría de mercurio)	$d = \frac{4\sigma \cos \phi}{P}$
Conectividad	Relación entre el número de conexiones (b) y el número de cavidades o nodos (n)	$c = b - n + 1$
Tortuosidad	Relación entre la longitud efectiva media de la trayectoria de un fluido (Le) y la dimensión del sólido (L)	$T = \left(\frac{Le}{L}\right)^2$

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO






Conectividad de poros

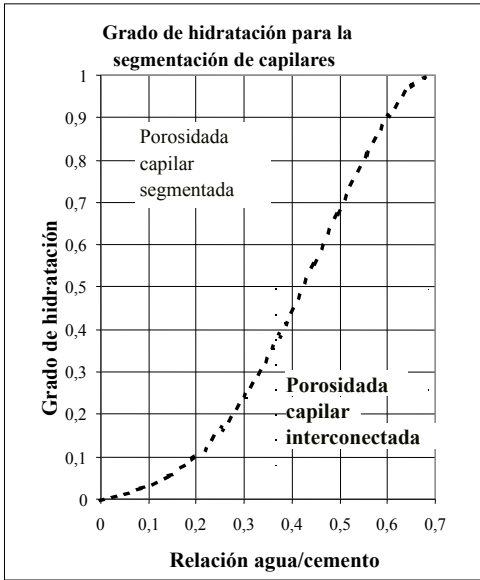
- ➔ El nivel de percolación importante, desde el punto de vista de los procesos de transporte, es el punto para el cual el espacio de poros capilares pierde continuidad.
- La reducción progresiva del radio medio de los capilares constituye un efecto complementario y menos significativo.




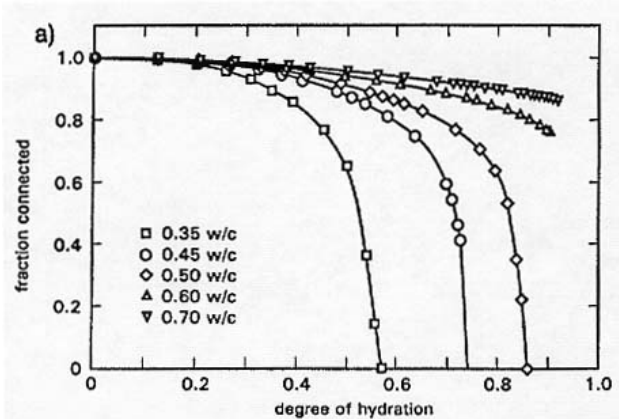


Duración del tiempo de curado (hidratación) necesarias para provocar la segmentación parcial de los capilares para distintas relaciones a/c

Relación a/c	Curado mín
0,40	3 días
0,45	7 días
0,50	14 días
0,60	6 meses
0,70	1 año
> 0,70	Imposible

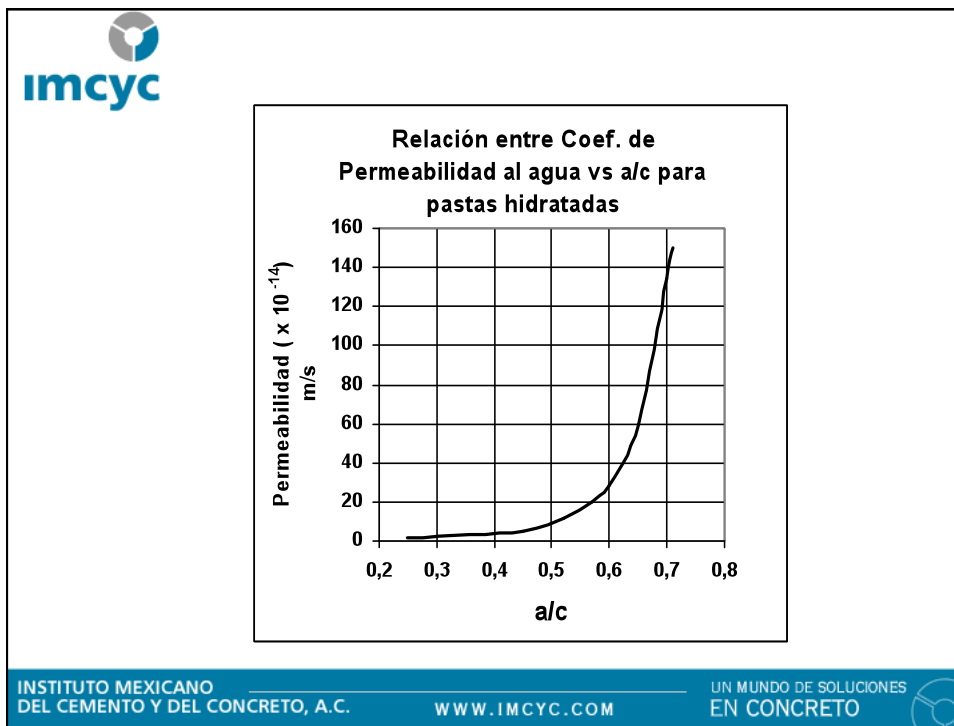


INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCyc.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO

Fracción de porosidad capilar conectada en función del grado de hidratación de pastas de cemento (resultado de modelación numérica, según E.G. Garboczi.)

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCyc.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO

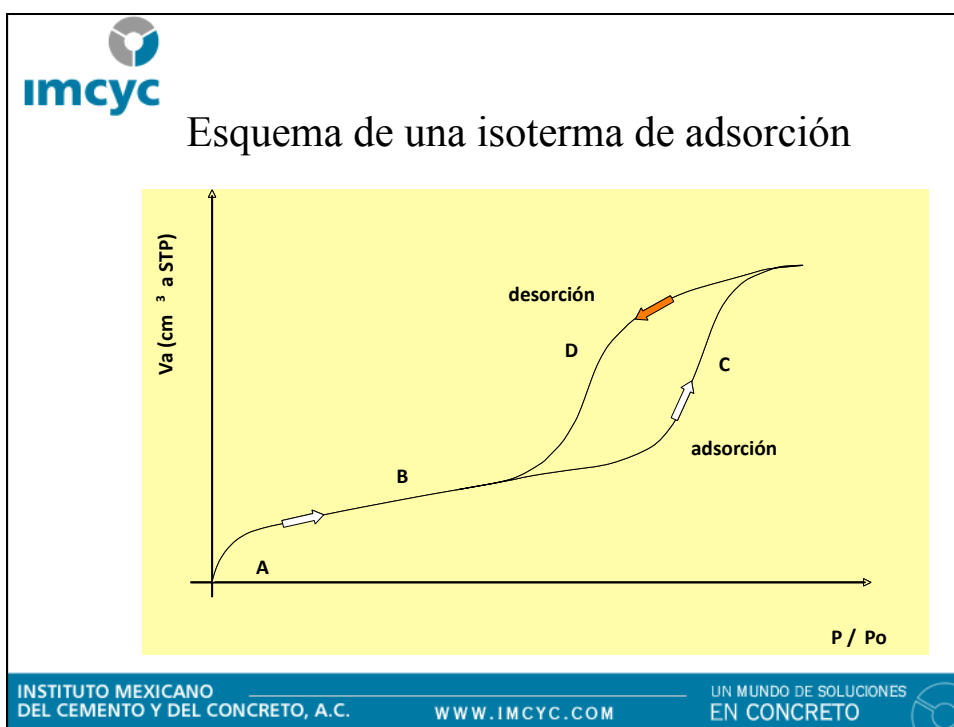
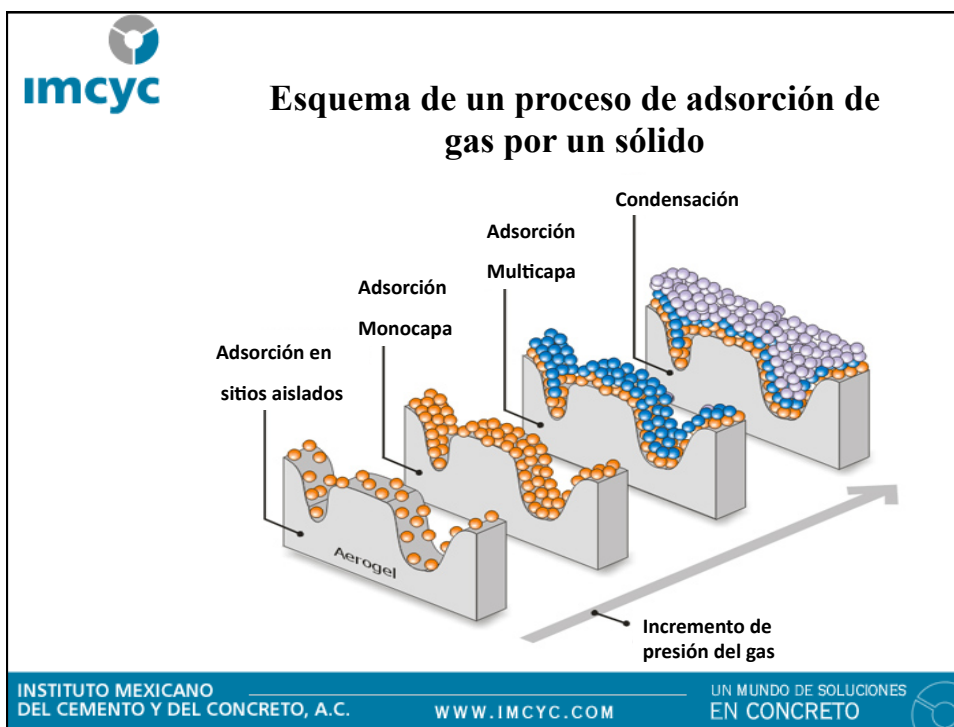


Interacciones entre el agua y el medio poroso

En aire húmedo, las superficies sólidas se recubren de moléculas de agua por fenómeno de adsorción. El número de capas de moléculas de vapor de agua adsorbidas sobre la superficie de un sólido en aire húmedo es función de la presión parcial de vapor.

En los materiales porosos, el fenómeno conduce a la condensación capilar

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO





Ecuación de Kelvin-Laplace

La existencia de una curvatura modifica la presión de vapor en la superficie del líquido, factor que controla los mecanismos de condensación.

$$\ln(P/P_0) = K \cdot V_m \cdot \gamma / R \cdot T \quad \ln\left(\frac{p^*}{p_0}\right) = \frac{-2 \cdot \gamma \cdot v \cdot \cos \phi}{R \cdot T \cdot r_m}$$

Siendo

P: presión de vapor en la superficie del líquido cuando adopta una curvatura media K

γ : tensión superficial del líquido

V_m : volumen molar del líquido

T: temperatura absoluta

R: Constante universal de los gases.



Interacciones entre el agua y el medio poroso

Para agua a 20°C, $\gamma = 0,074$ N/m (tensión superficial)

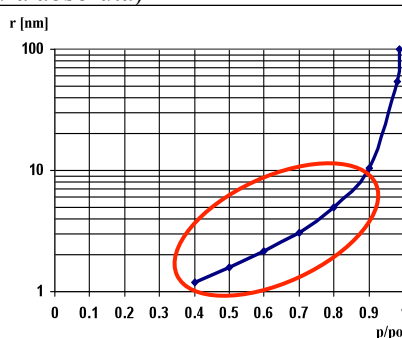
$V = 18,05$ cm³/mol (volumen molar del agua)

$R = 8,314$ J/mol. K (constante de los gases)

$T = 293$ °K (temperatura absoluta)

$$r[m] = 1,1 \cdot 10^{-9} / \ln(p/p_0)$$

Para HR entre 40 % y 90 %, los poros de 1 a 10 nm tienen agua por fenómenos de condensación



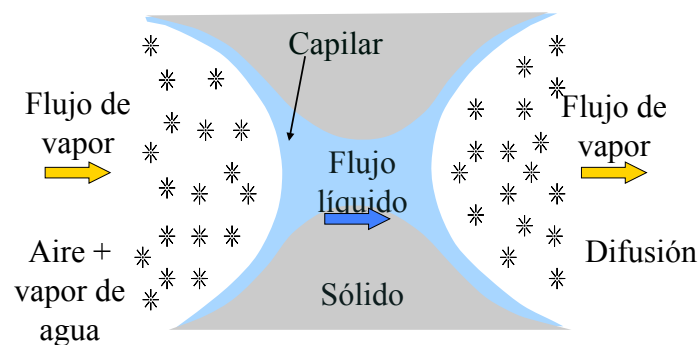


Consecuencia de la influencia del radio del poro

- Cuando aumenta la presión de vapor, tiene a condensar agua “líquida” sobre la superficie del sólido.
- Esta condensación ocurre a presiones menores cuando la superficie es curva, tanto menores cuanto menor es el radio de curvatura.
- Los poros pequeños siempre se encuentran con agua líquida para las condiciones habituales de los hormigones.

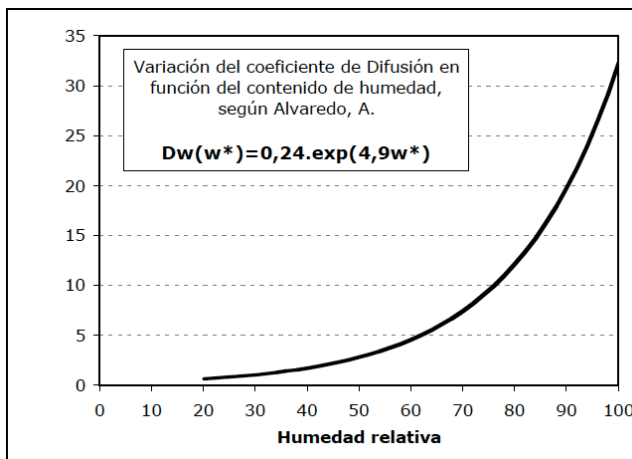


Flujo combinado de vapor y agua líquida

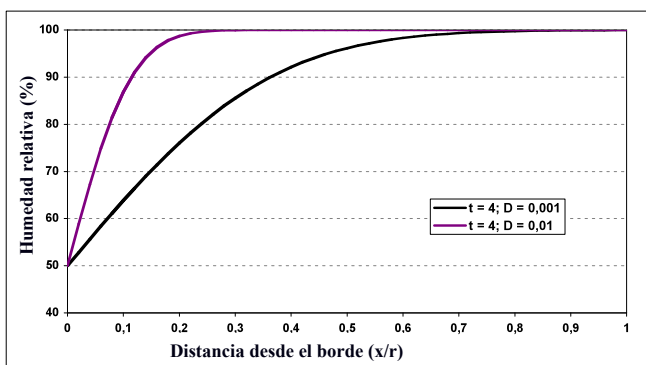




La “difusividad” del agua no es constante

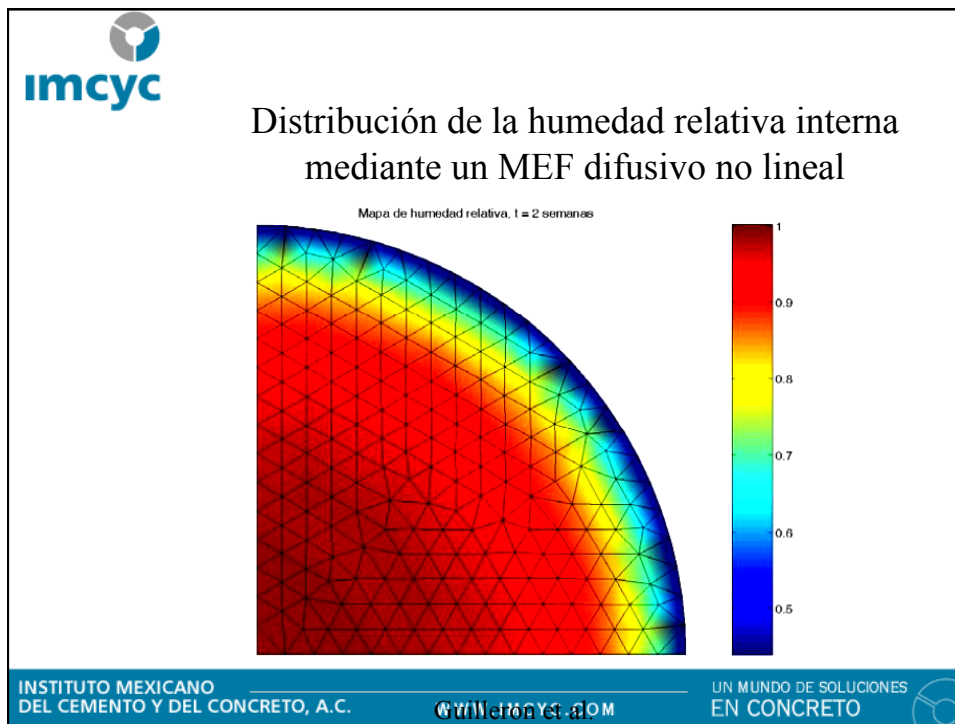



Un diagrama ideal de perfil de humedad relativa permite observar que el secado involucra preferentemente la zona expuesta, y el interior se mantiene próximo a la saturación



$$H(x,t) = He + (Hi - He) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x/a}{2\sqrt{D \cdot t}}\right)$$








¿Por qué interesa esto?

Porque la presencia de agua líquida condiciona la capacidad de transporte de fluidos (líquidos y gases) en el hormigón

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. [WWW.IMCYC.COM](http://www.imcyc.com) UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 



Rol del Agua (Humedad) en la Durabilidad

La mayoría de los procesos de deterioro físico-químicos están fuertemente influenciadas por el grado de saturación de los poros del Concreto, como por ejemplo:

- La carbonatación sólo ocurre en los grados intermedios de saturación
- El daño por helada sólo ocurre cuando el Concreto está totalmente saturado o cercano a ello
- El gel álcali-sílice sólo se expande en presencia de suficiente humedad
- El ataque químico sólo puede ocurrir a través de soluciones acuosas de los componentes agresivos

El Concreto seco (interior de un edificio) es inmune al deterioro



Gracias por su atención

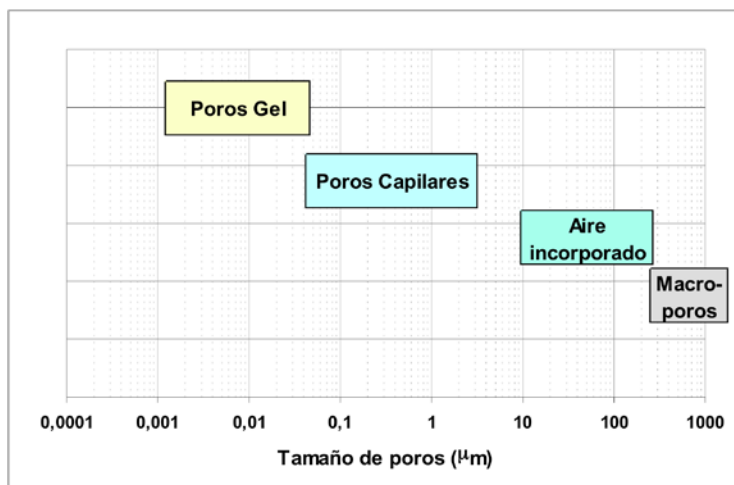




Anexo complementario



Tamaños de la estructura de poros en el hormigón






Porosimetría por intrusión de mercurio.



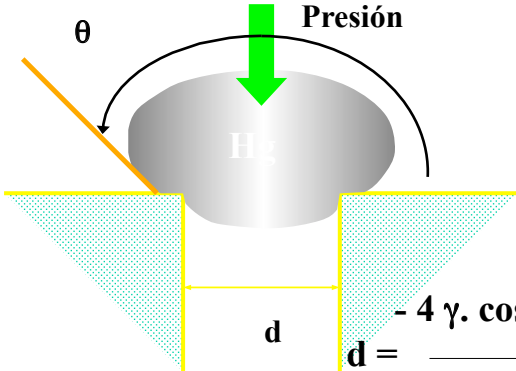
Una vez rodeada la muestra por el mercurio, se fuerza a que éste ingrese en los poros de la muestra con incrementos escalonados de la presión.

Para cada nivel de presión, el equipo registra el volumen intruido, para presiones crecientes (intrusión) y decrecientes (extrusión).

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.
WWW.IMCYC.COM
UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO



Mercurio en contacto con un poro de abertura de ingreso “d”

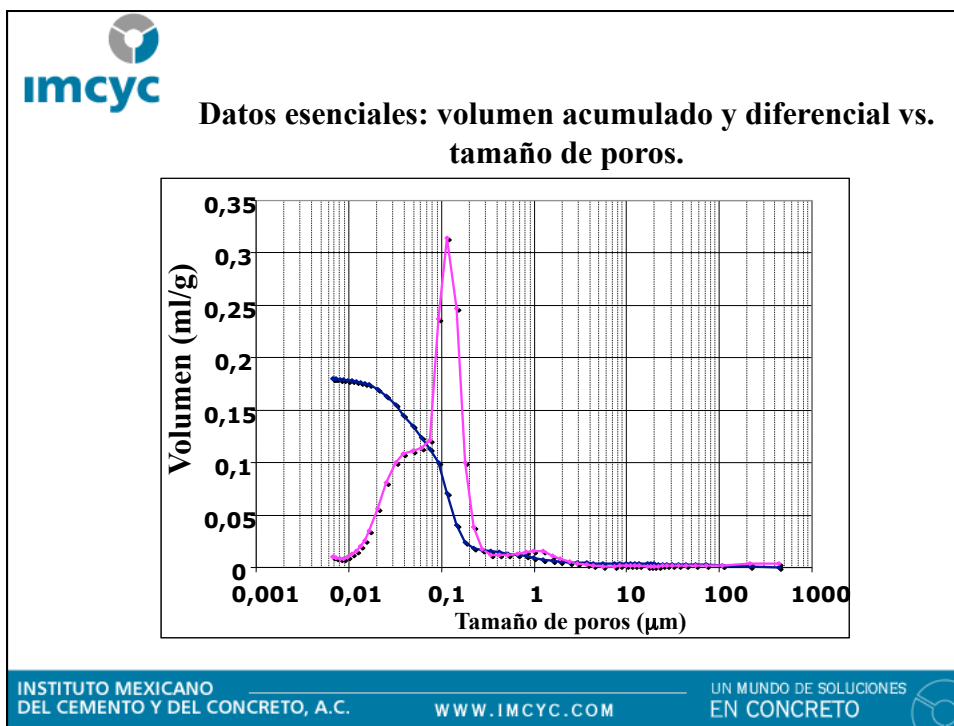
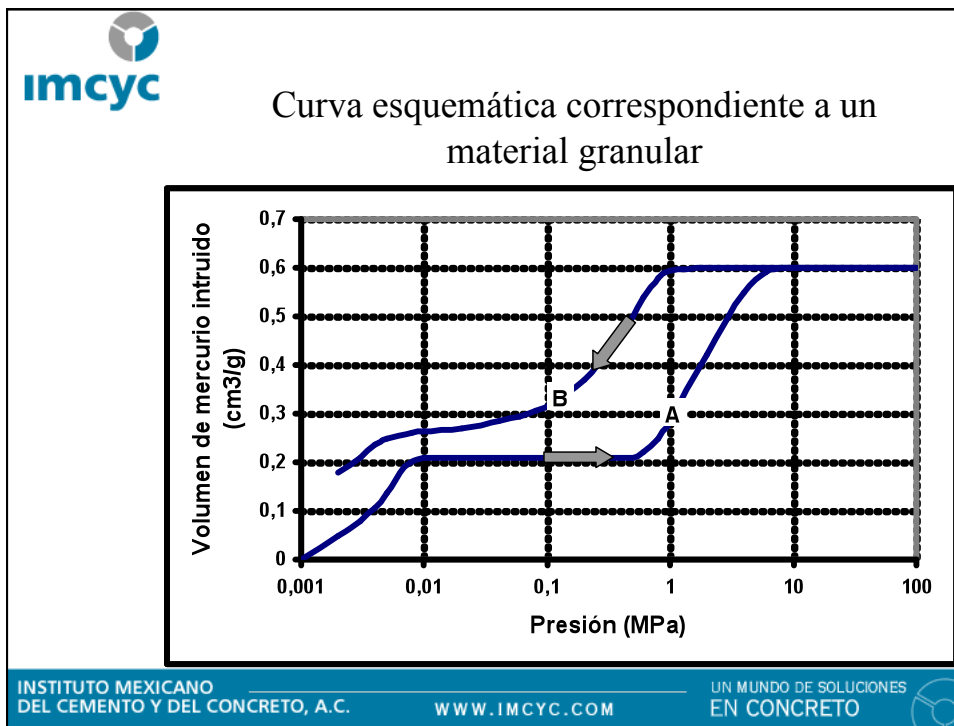



$$F1 = - \pi d \gamma \cdot \cos \theta$$

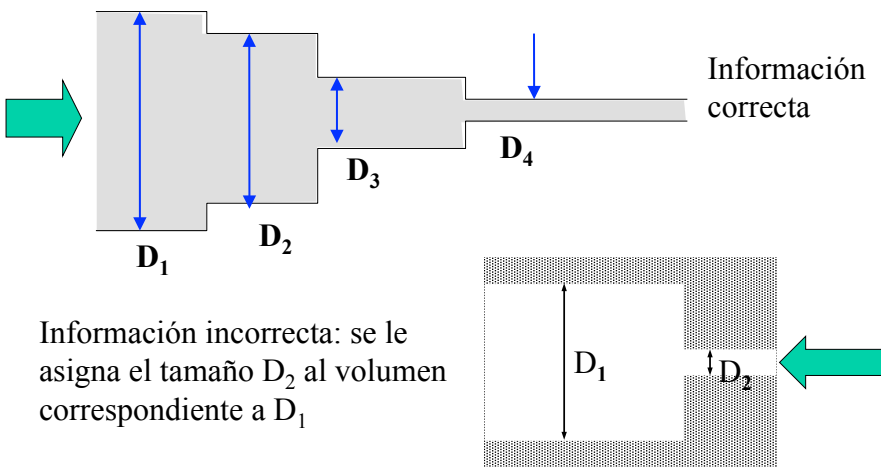
$$F2 = P \pi d^2 / 4$$

$$d = \frac{- 4 \gamma \cdot \cos \theta}{P} \quad (\text{Ec. de Washburn})$$

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C.
WWW.IMCYC.COM
UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO



 **Análisis del efecto “cuello de botella” y el ordenamiento “jerárquico de los poros”.**



Información incorrecta: se le asigna el tamaño D_2 al volumen correspondiente a D_1

Información correcta

INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 