



imcyc

Métodos de medición en laboratorio de la "penetrabilidad" del concreto de recubrimiento

Eric I. Moreno & Roberto J. Torrent

Objetivo

- Describir en detalle los principales métodos de ensayo, de laboratorio, para medir la “penetrabilidad” del recubrimiento
- El tratamiento se circunscribe a métodos cubiertos por Normas o Recomendaciones RILEM

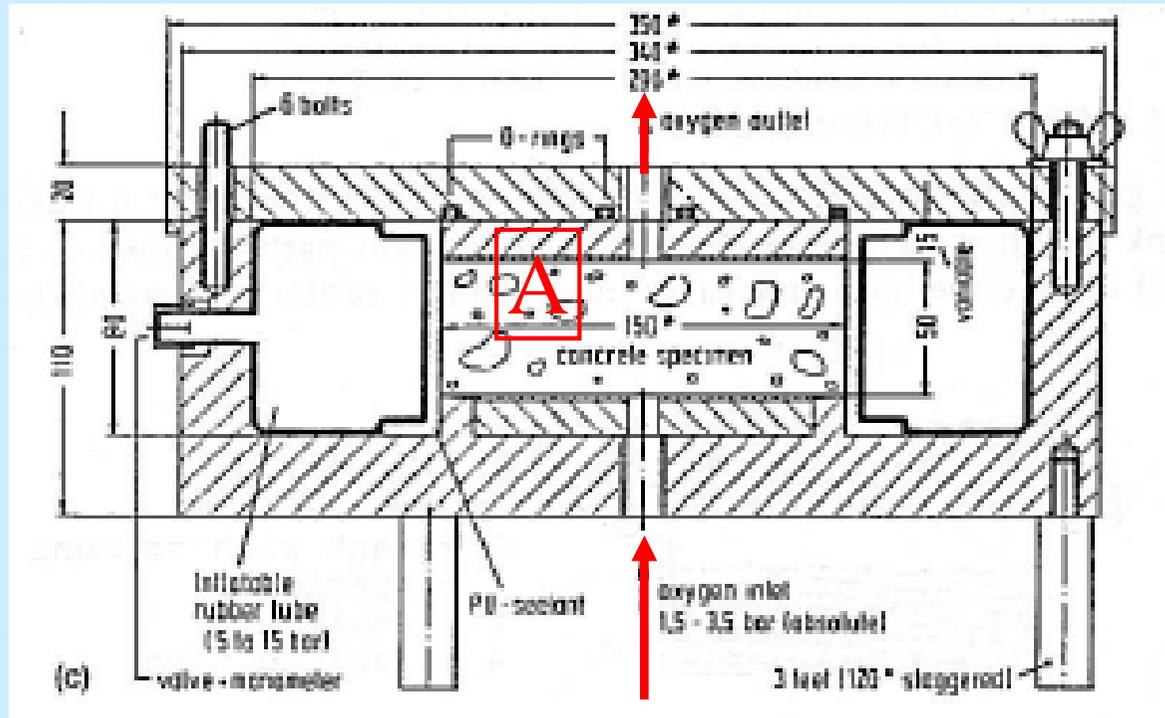
Contenido de la Presentación

1. Ensayos Normalizados y/o cubiertos por Recomendación de RILEM
 - a) Permeabilidad a los gases
 - b) Permeabilidad al agua
 - c) Succión Capilar
 - d) Difusión
 - e) Migración
2. Ensayo Comparativo de RILEM
3. Relaciones entre ensayos

Métodos cubiertos por Normas o Recom. RILEM

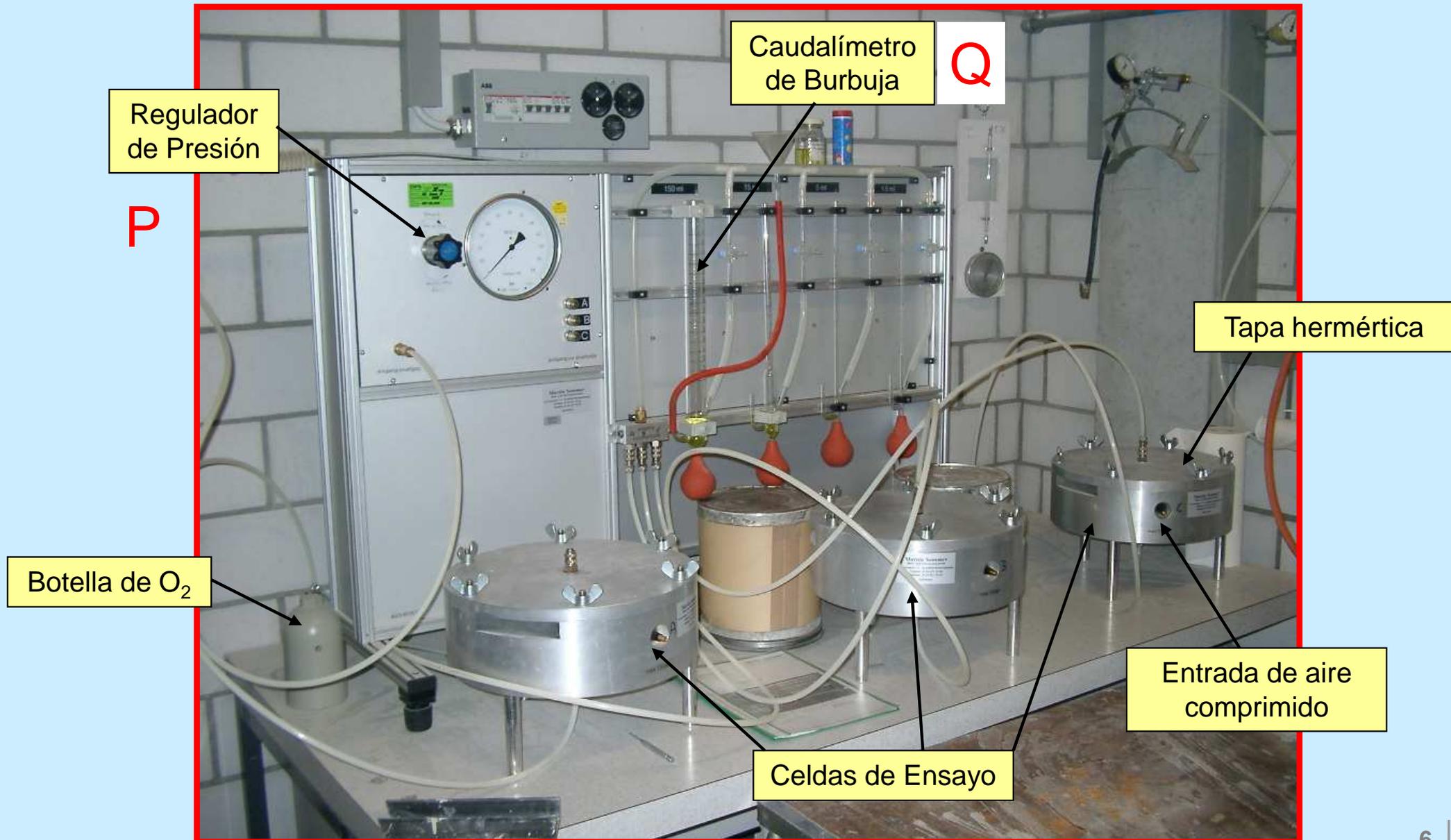
Transporte	Estado	Duración de 1 Ensayo	Método	Uso	Norma Recomend. RILEM
Permeabilidad al O ₂	Estac.	1-5 horas	Cembureau	Lab	RILEM
Permeabilidad al Aire	Trans.	< 15 min	Torrent	Lab/Situ	SIA Suiza
Permeabilidad al H ₂ O	Trans.	4 días	Penetración de Agua	Lab	EN CIRSOC
Succión Capilar	Trans.	1-7 días	Fagerlund	Lab	RILEM SIA Suiza, IRAM
Succión Capilar	Trans.	2 horas	ISAT	Lab/Situ	BS
Difusión de Cl ⁻	Trans.	90 días	AASHTO	Lab	AASHTO
Migración de Cl ⁻	Trans.	6 horas	Whiting	Lab	AASHTO/ASTM
Migración de Cl ⁻	Trans.	24 horas	Tang y Nilsson	Lab	NT Escandinavia SIA Suiza
Resistividad (Migración)	Estac.	< 5 min	Wenner	Lab/Situ	ASTM/RILEM

Permeabilidad al Oxígeno (Cembureau) Recomendación Rilem 116-PCD



$$Q = K \frac{A}{\mu} \frac{P^2 - P_{at}^2}{2P_{at}L}$$

Permeabilidad al Oxígeno (Cembureau) Recomendación Rilem 116-PCD

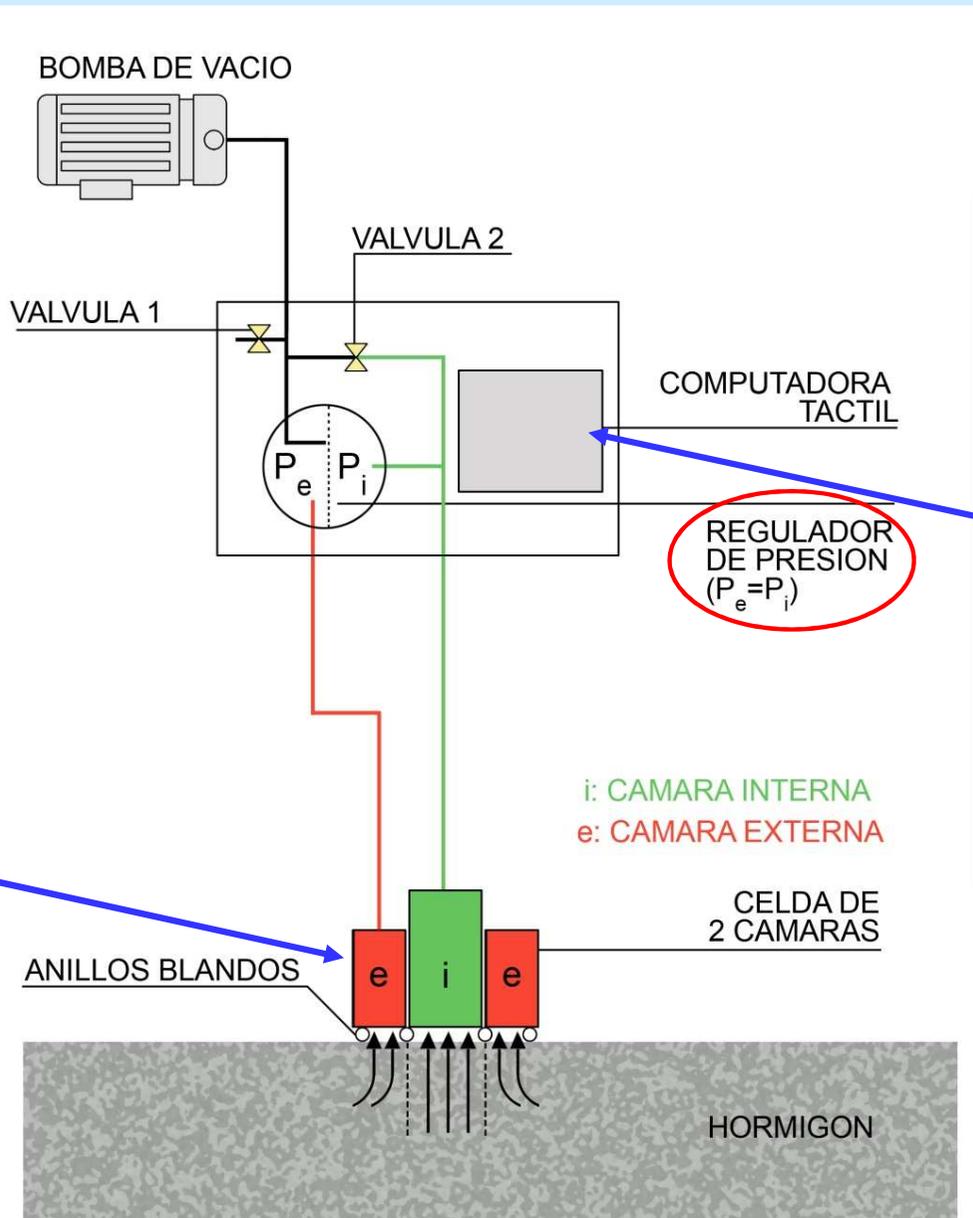


Permeabilidad al Oxígeno (Cembureau) Recomendación Rilem 116-PCD

Recomendaciones Prácticas:

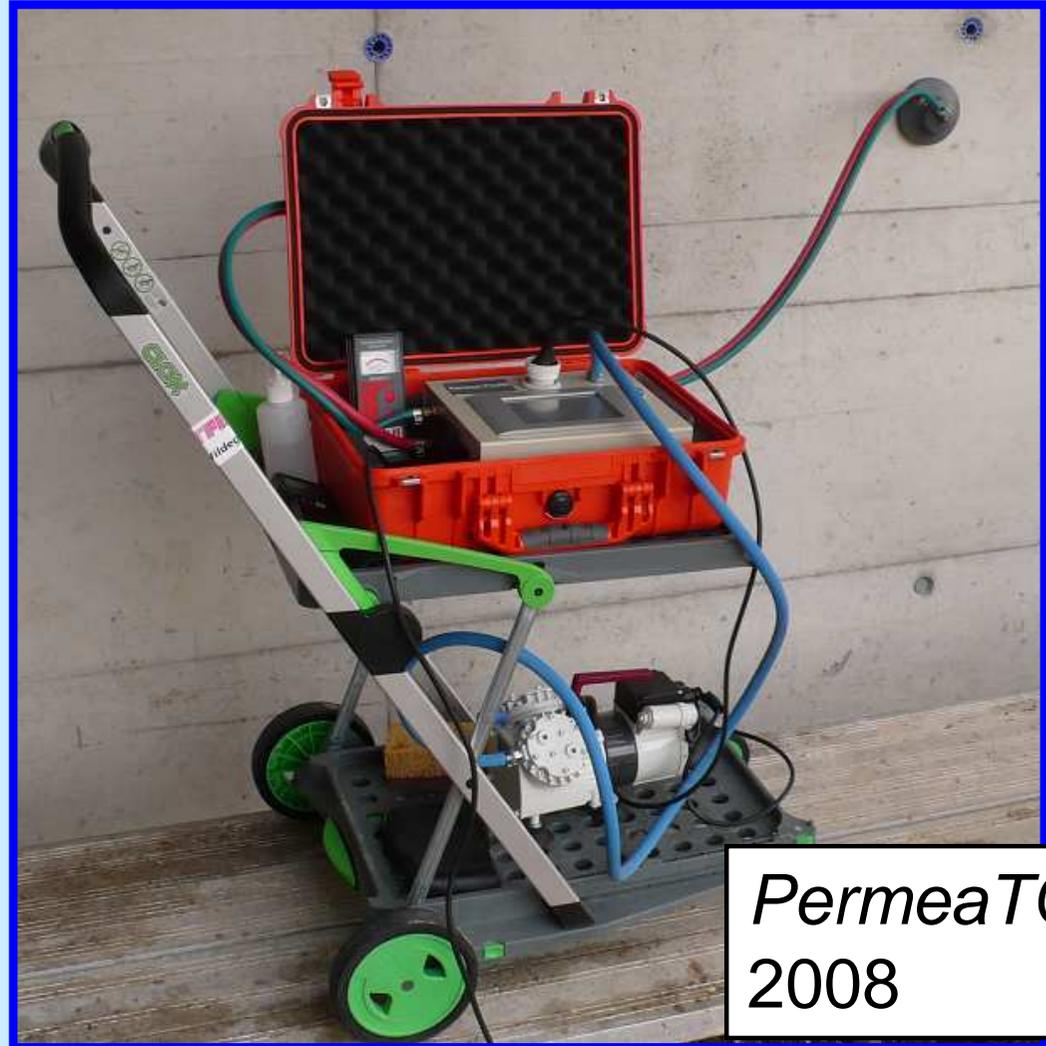
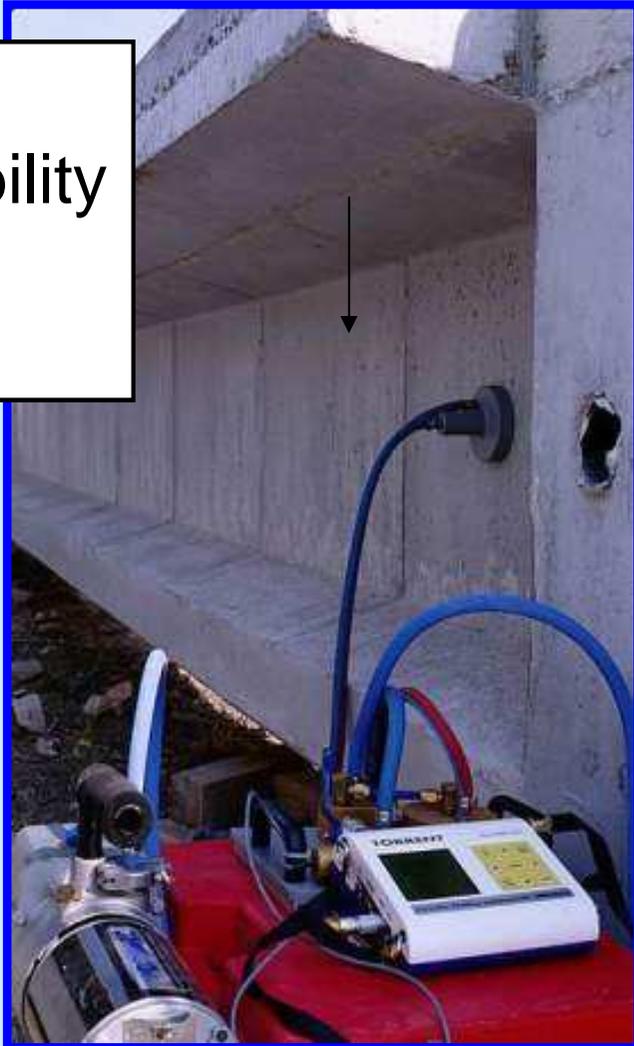
- Medir al menos a 2 presiones (1 y 2.5 bar relativa), en general es suficiente, promediar ambos resultados
- La permeabilidad a mayor presión debe ser menor
- Obtener el promedio de dos probetas
- Pretratamientos
 - Recom. RILEM 116-PCD (poco práctico)
 - Holcim: 6 días a 50°C y 1 d. en desecador a 20°C
 - IETcc: secado 4 días expuestas a 50° + 3 días selladas a 50°C

Permeabilidad al Aire "in situ": SIA 262/1E:2013



Equipos Comerciales

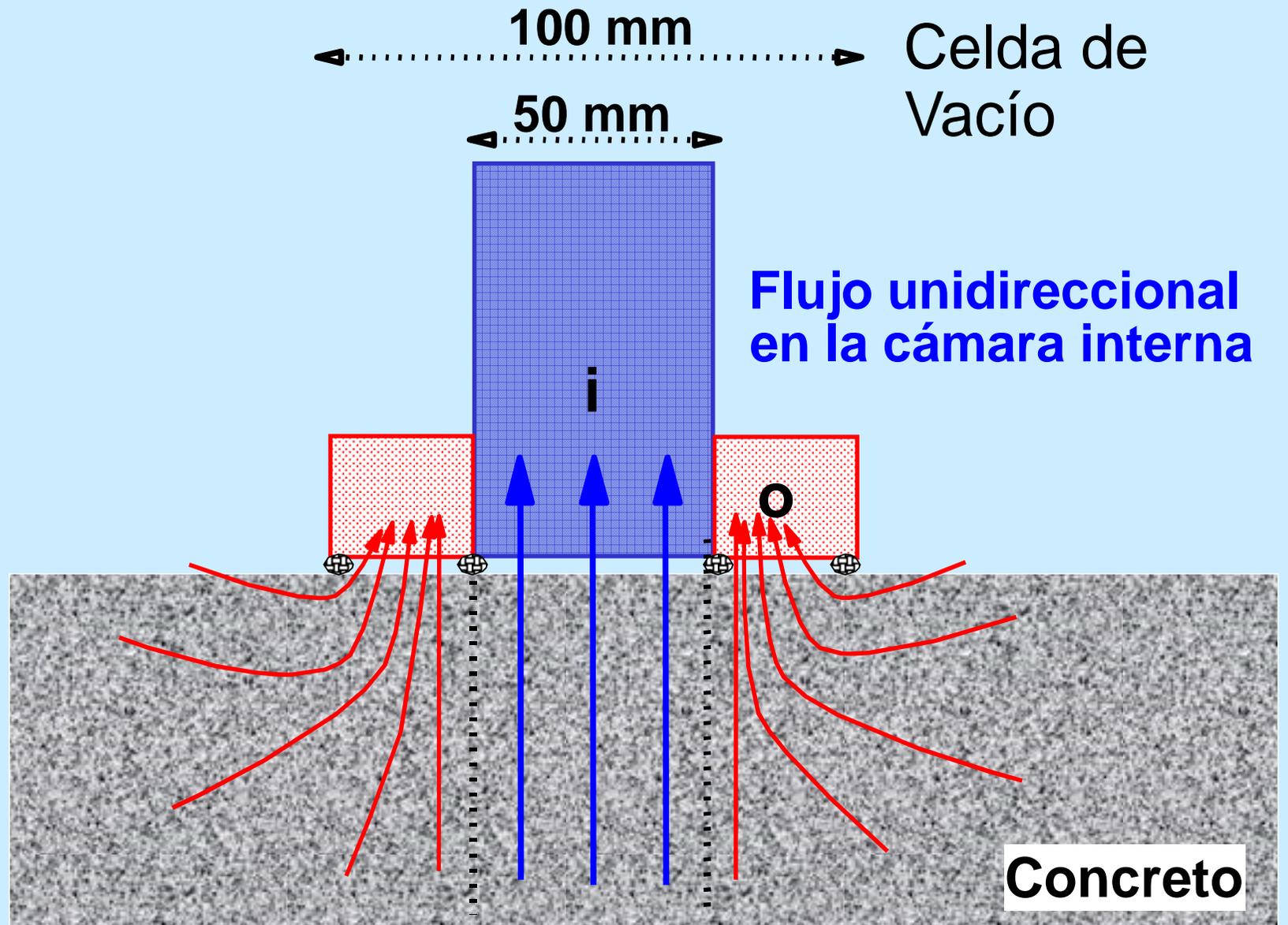
Torrent
Permeability
Tester
(~1995)



PermeaTORR
2008

Torrent Permeability Tester

Flujo de aire controlado a la cámara interna



Cálculo de kT (a partir de Ley de Poiseuille)

$$kT = \left[\frac{V_c}{A} \right]^2 \frac{\mu}{2 \varepsilon P_a} \left[\frac{\ln \frac{P_a + \Delta P}{P_a - \Delta P}}{\sqrt{t} - \sqrt{t_0}} \right]^2$$

- kT : coeficiente de permeabilidad al aire (m^2)
- V_c : volumen de la celda interna + tubería (m^3)
- A : área de la celda interna (m^2)
- μ : viscosidad del aire ($N.s/m^2$)
- ε : estimación de la porosidad del concreto (=0.15)
- P_a : presión atmosférica (N/m^2)
- t : tiempo (s) al final del ensayo (90 a 720 s)
- t_0 : tiempo (s) al inicio de la medición (60 s)
- ΔP : aumento de presión entre t_0 y t (N/m^2)

Clases de Permeabilidad

Clase de Permeabilidad		kT (10^{-16} m ²)
1	Despreciable	< 0.001
2	Muy Baja	0.001 - 0.01
3	Baja	0.01 - 0.1
4	Moderada	0.1 - 1.0
5	Alta	1.0 - 10
6	Muy Alta	> 10

Permeabilidad al Agua: Ensayo de Penetración de Agua (DIN 1048, EN 12390-8)

Presión de Agua P

DIN

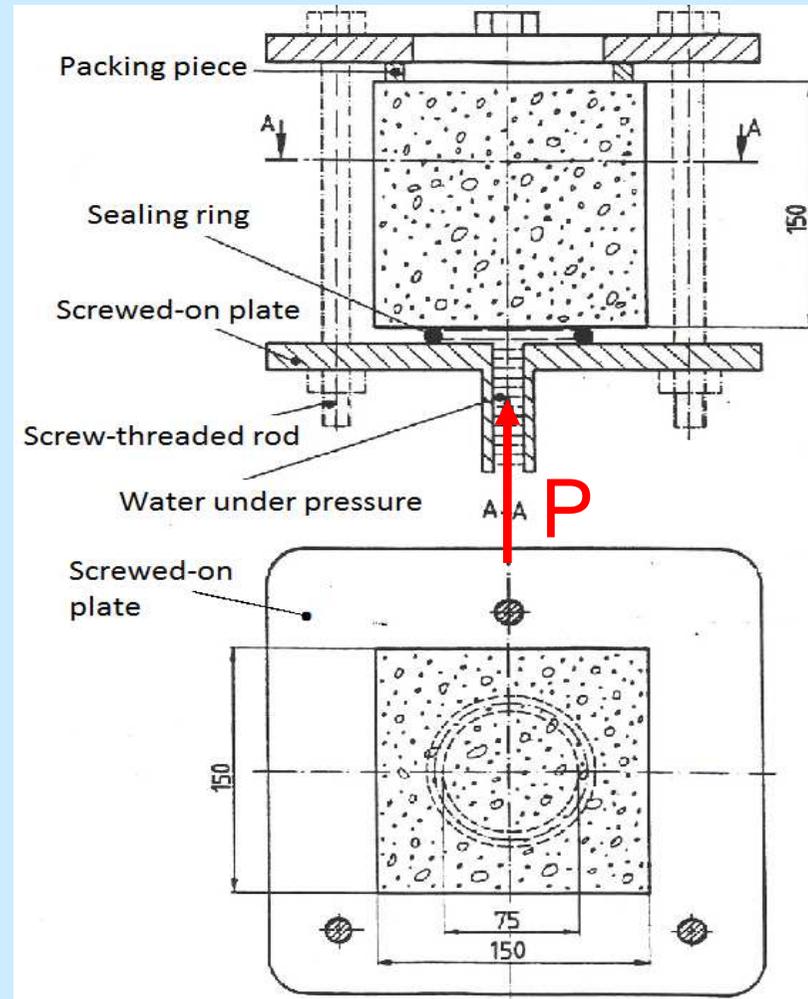
0-48 h: 0.1 MPa

48-72 h: 0.3 MPa

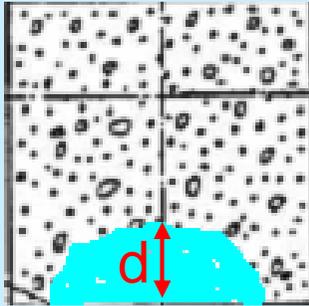
72-96 h: 0.7 MPa

EN

0-72h: 0.5 MPa



Ensayo de Penetración de Agua (DIN 1048, EN 12390-8, Recomendación CIRSOC)



El principio del ensayo es el mismo en todas las normas, pero los detalles varían en cada caso.

Se parte el cubo en dos (similar al ensayo brasileño) y se dibuja directamente sobre la probeta el contorno de la penetración de agua.

En la EN se mide la penetración máxima **d** que, expresada en mm, es el resultado del ensayo. Se redondea al 1 mm más próximo (antes era a los 5 mm, que parece más razonable dada la heterogeneidad del material)

Ensayo de Penetración de Agua

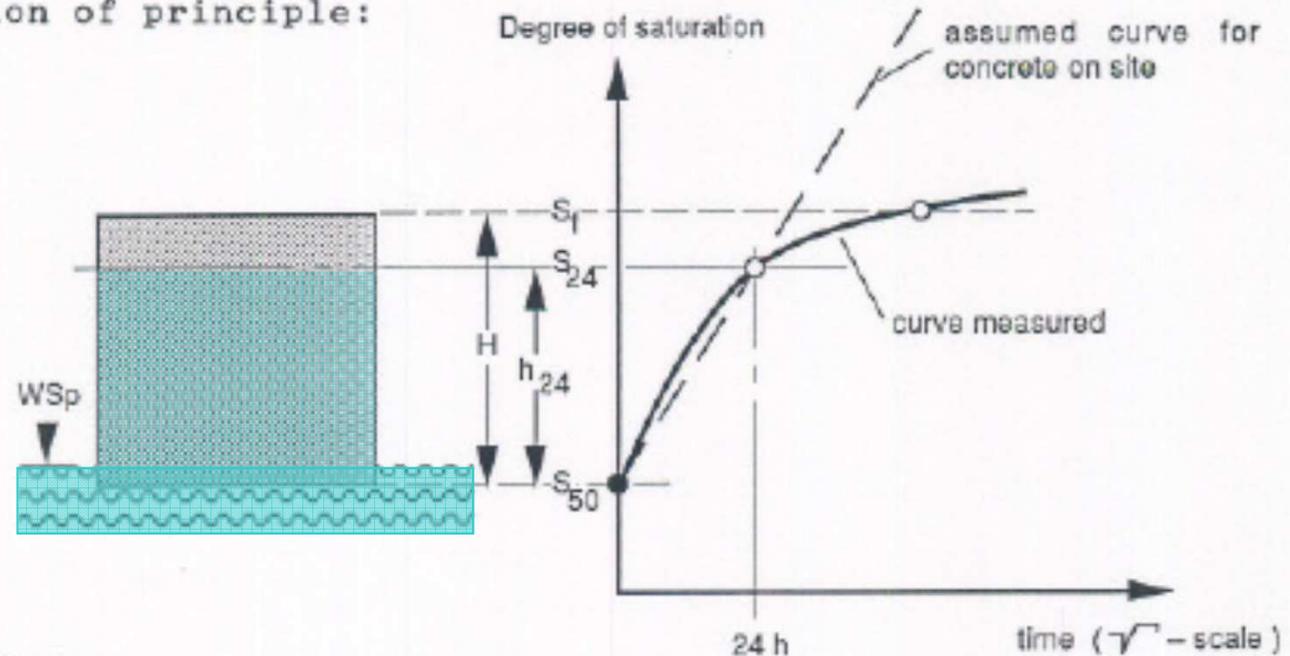
En algunas normas se establece que la probeta debe secarse en estufa a 50°C antes de comenzar a aplicar el agua a presión. En este caso, el agua penetra naturalmente en el concreto por capilaridad, no es necesario forzarla.

El ensayo sólo tiene sentido si se hace sobre probetas saturadas y entonces es más difícil medir la profundidad de penetración. Es lo que prescribe la EN, manteniendo la presión constante (0.5 MPa) durante 3 días.

Algunos laboratorios agregan un pigmento para facilitar la medición de profundidad, pero no debe colmatar los poros.

Succión Capilar. Normas Suiza SIA 262/1:2003, Recomendación Rilem, ASTM C 1585:04

Illustration of principle:



$$a_t = m_t / A / t^{0.5}$$

a_t = coeficiente de succión capilar
($\text{g}/\text{m}^2/\text{s}^{0.5}$)

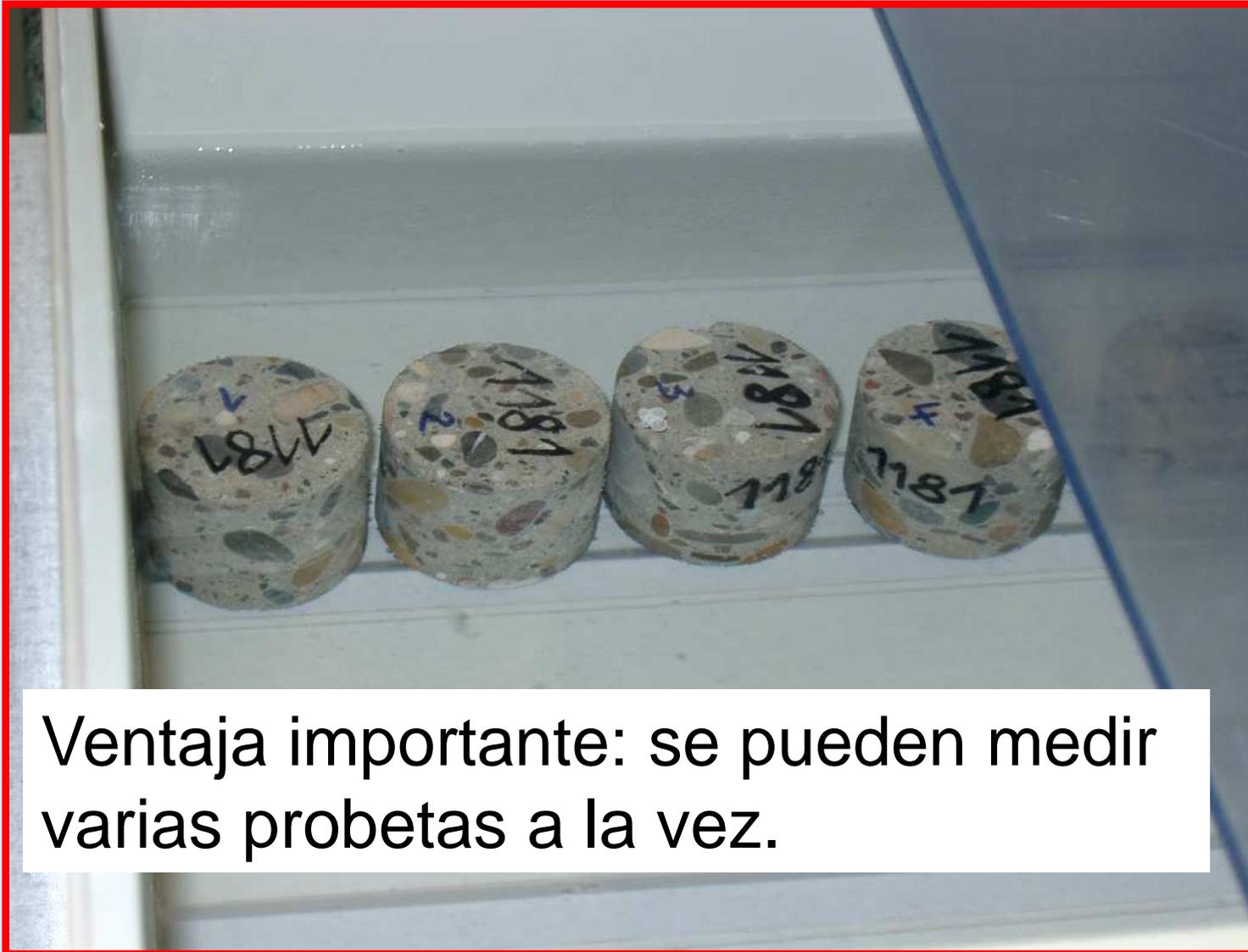
$$S_t = h_t / t^{0.5}$$

S_t = "sorptividad" ($\text{mm}/\text{s}^{0.5}$)

$$a_t = \varepsilon \delta S_t$$

ε : porosidad del concreto
 δ : densidad del agua (kg/m^3)

Succión Capilar. Normas Suiza SIA 262/1:2003, Recomendación Rilem, ASTM C 1585:04



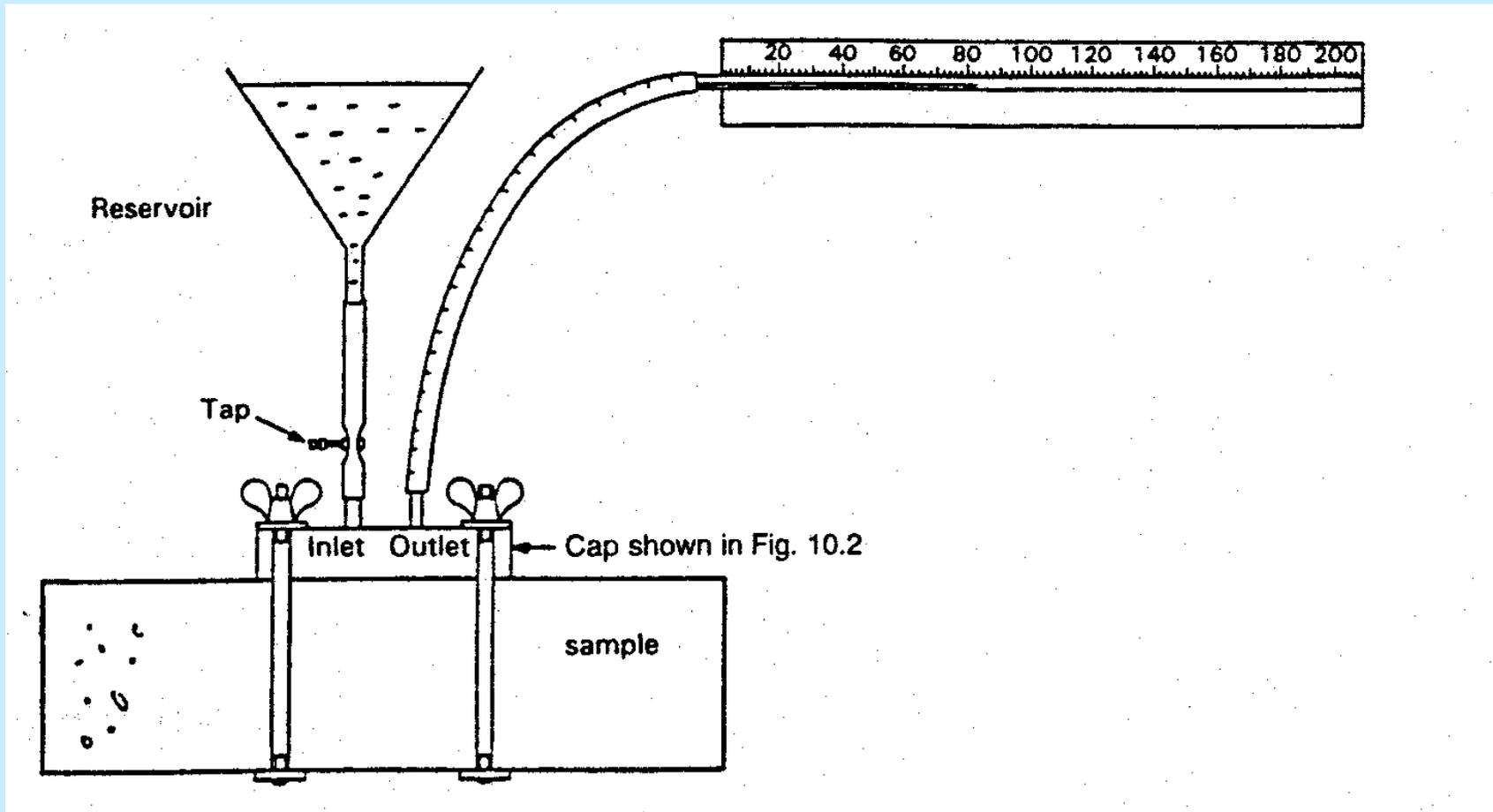
Ventaja importante: se pueden medir varias probetas a la vez.

Succión Capilar. Normas Suiza SIA 262/1:2003, Recomendación Rilem, ASTM C 1585:04

Recomendaciones Prácticas:

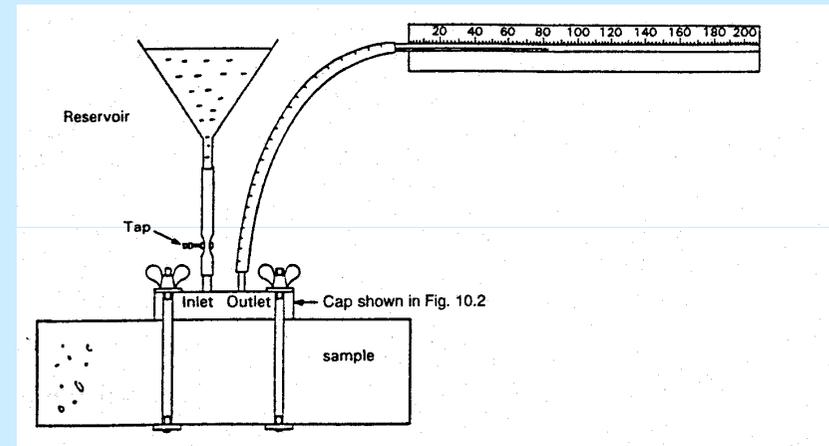
- Medir a distintas edades, p-ej. 0.5, 1, 3 y **24** horas (3, 7 y 14 días si se desea mayor información)
- Tapar el recipiente para mantener una atmósfera saturada alrededor de las probetas
- Se puede o no sellar los laterales de las probetas (depende de las normas)
- Obtener el promedio de dos probetas
- Pretratamientos (igual que para el Cembureau)
- Se puede hacer sobre la misma probeta, después de medir permeabilidad a los gases (Cembureau y/o Torrent)

Succión de Agua: ISAT (B.S. 1881 : Part 5) Lab + "In Situ"



Problemas en la fijación del casquete,
en laboratorio y aún más en obra.

Succión de Agua: ISAT (B.S. 1881 : Part 5)



$$ISA = 0.6 D / \delta t$$

donde:

ISA = Velocidad de succión de agua (ml/m²/s)

D = Número de unidades de escala cubierto por la retracción del menisco en el tiempo δt (s)

Difusión de Cloruros (AASHTO T 259)



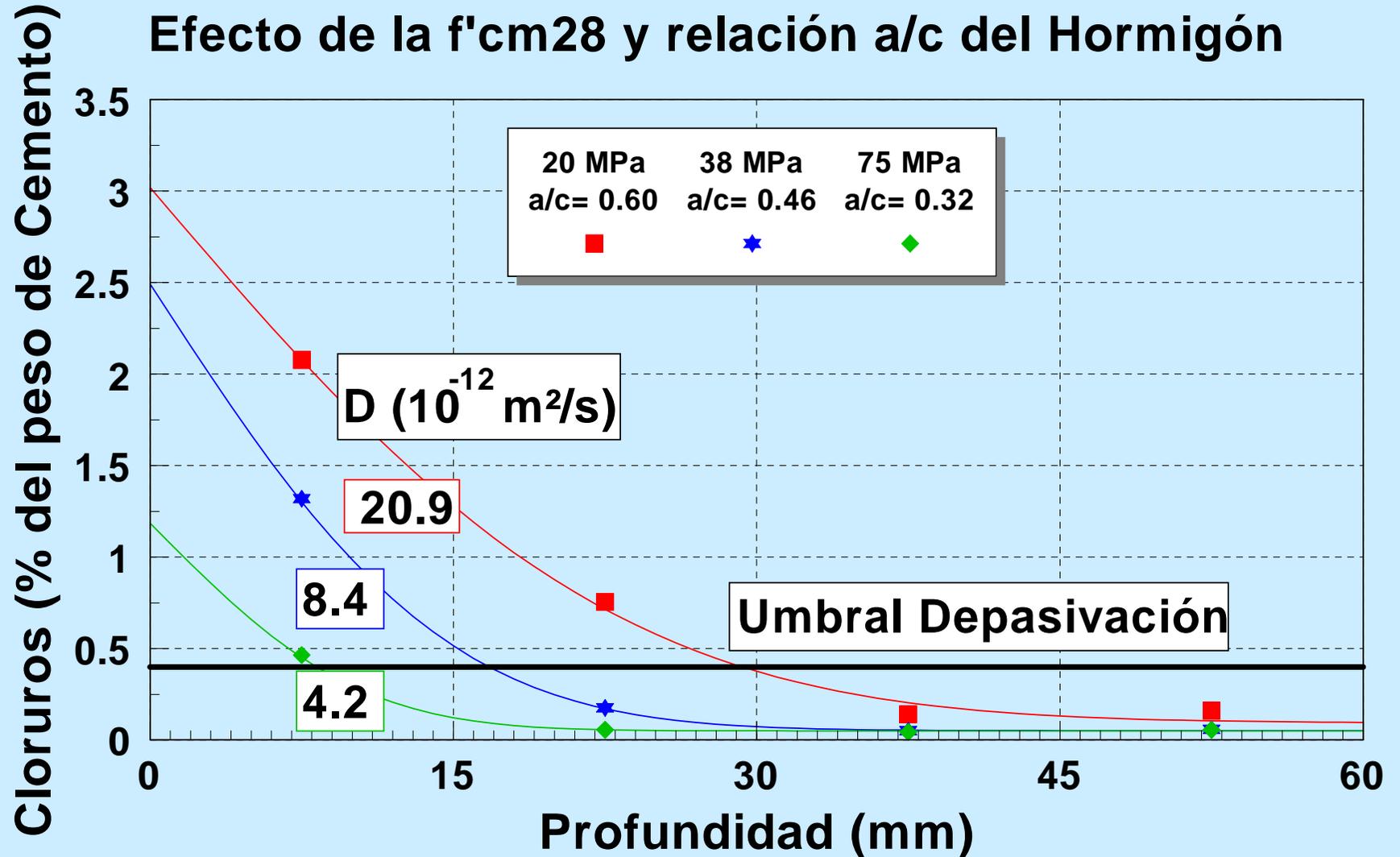
Se mantiene la solución durante 90 días. Luego se extraen testigos, se cortan en rodajas y se determina el contenido de cloruros en función de la profundidad.

Se ajusta la solución de la 2^a Ley de Fick a los resultados experimentales, obteniéndose C_s y D .

Aplicación de la 2ª Ley de Fick a Cloruros

Perfil de Cloruros a los 90 días (AASHTO T 259)

Efecto de la f'_{cm28} y relación a/c del Hormigón



Cálculo del coeficiente de Difusión



$$\text{Solución } \rightarrow C(x,t) = C_s \cdot \left\{ 1 - f_{\text{err}} \left[\frac{x}{2 \cdot (D \cdot t)^{1/2}} \right] \right\}$$

para $C_{(t=0)} = 0$

C_s = concentración superficial (supuesta constante en el tiempo)

f_{err} = función error

requiere una iteración para obtener el valor de **D** que dé el mejor ajuste a los valores experimentales.

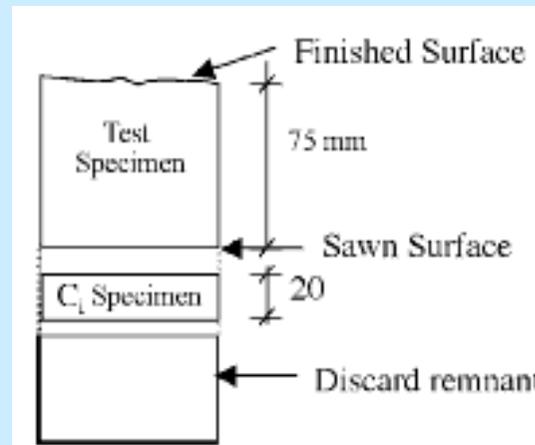
AASHTO T259

Recomendaciones Prácticas:

- Las probetas deben estar saturadas con agua al comenzar el ensayo (evitar fenómenos de succión que predominan sobre los de difusión)
- Obtener rodajas cada 10 mm (los 15 mm de la figura anterior no son suficientes), con corte „en seco“.
- Obtener el promedio de dos probetas
- No siempre se obtienen resultados coherentes de **D**
- Un valor más estable es la cantidad de cloruros que penetran por unidad de área, que es proporcional al área por debajo del perfil de cloruros y que se puede obtener analíticamente como función de C_s y D .

ASTM C1556:04, basada en la NT Build 443

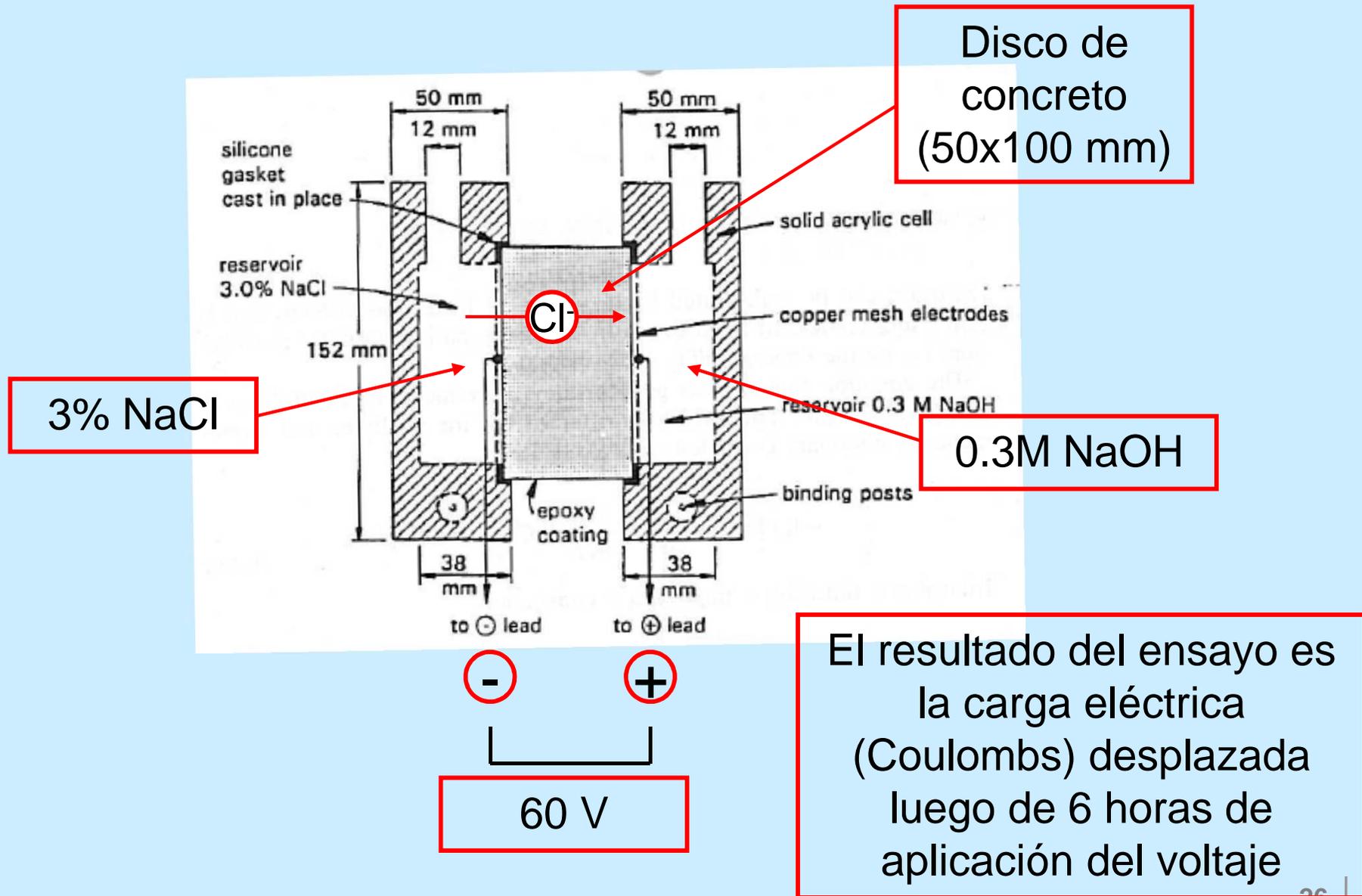
Similar al AASHTO, sólo que la probeta (cortada de un cilindro) se sella en todas sus caras menos la de acabado y se sumerge en una solución de NaCl por al menos 35 días



Se toma una rodaja de 20 mm para medir el contenido original de cloruros C_i antes del ensayo. Se obtiene un perfil de cloruros y se obtienen C_s y D_a de:

$$C(x,t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_a \cdot t}} \right) \quad (1)$$

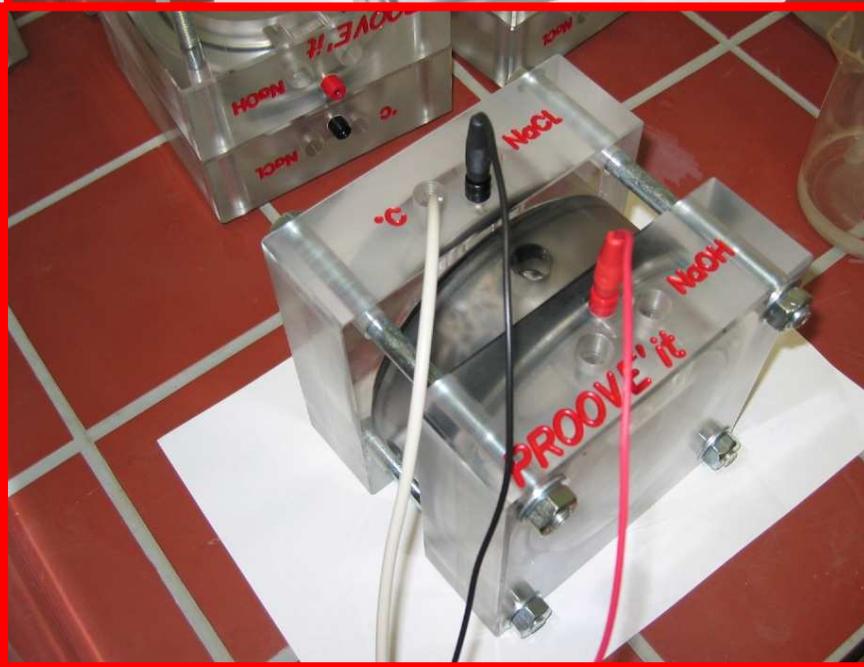
ASTM 1202:10 - Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration



ASTM 1202:10 - Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration



ASTM 1202:10 - Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration



ASTM 1202:10 - Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration

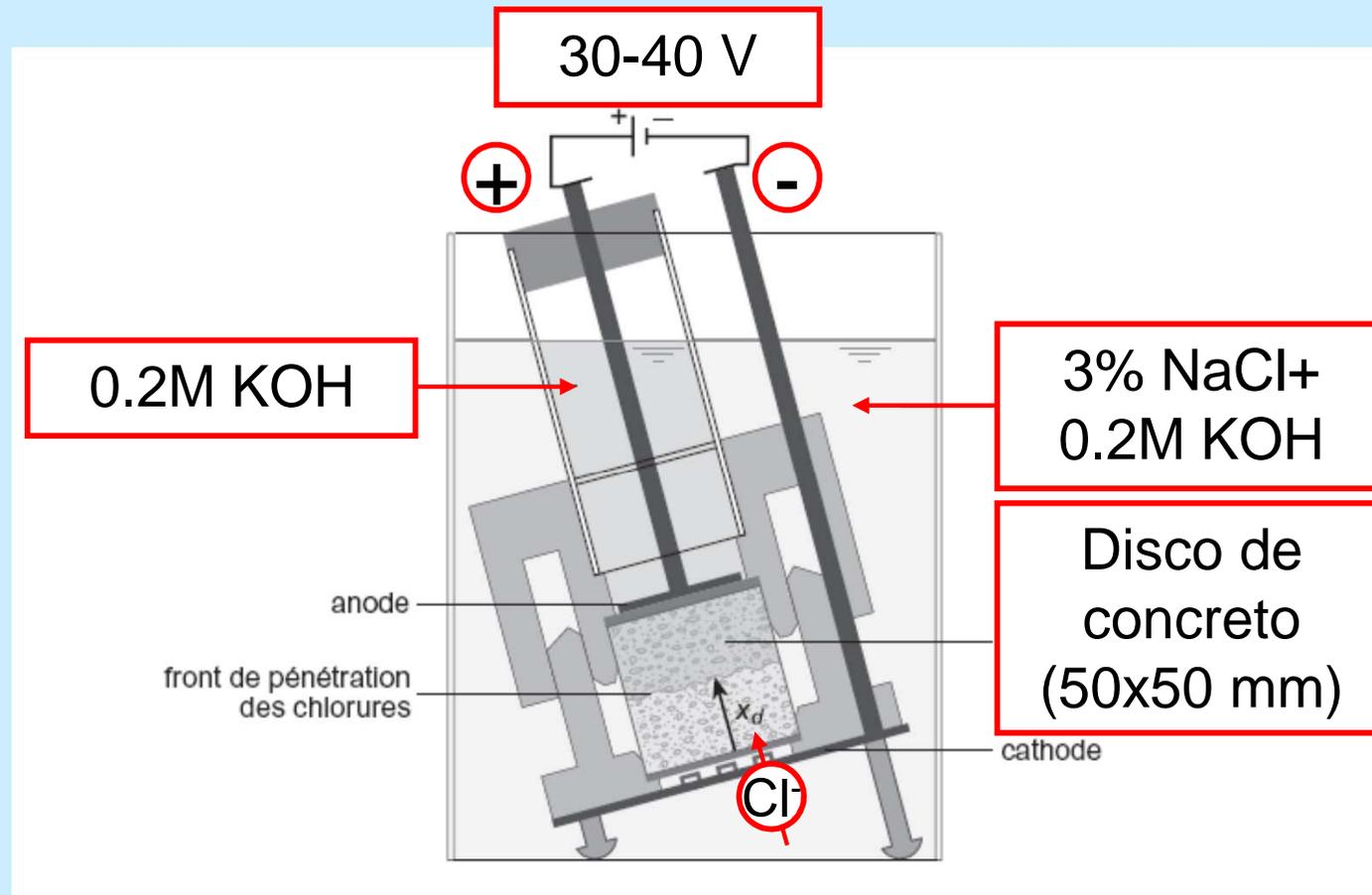
Es un ensayo bastante controvertido, aunque de uso muy difundido. Principales cuestionamientos:

- Antes de comenzar el ensayo, se genera un gradiente de concentración de iones (especialmente OH^-), por lo que se superpone difusión y migración.
- La carga eléctrica medida es la contribución del desplazamiento de TODOS los iones y no sólo de los cloruros, con un papel primordial de los iones OH^- .
- Por ello, puede distorsionar la comparación de concretos hechos con distintos tipos de adiciones.
- Además, para concretos de baja calidad, la elevada corriente que pasa genera un aumento considerable de temperatura del sistema, que distorsiona los resultados.

ASTM 1202:10 - Rating

Chloride Permeability	Charge (coulombs)	Type of Concrete	Total Integral Chloride to 41 mm Depth After 90-day Ponding Test
High	>4,000	high water-to-cement ratio (>0.6) conventional Portland cement concrete	>1.3
Moderate	2,000-4,000	moderate water-to-cement ratio (0.4-0.5) conventional Portland cement concrete	0.8 - 1.3
Low	1,000-2,000	low water-to-cement ratio (<0.4) conventional Portland cement concrete	0.55 - 0.8
Very Low	100-1,000	latex modified concrete, internally sealed concrete	0.35 - 0.55
Negligible	<100	polymer impregnated concrete, polymer concrete	<0.35

NordTest NT BUILD 492:1999 y SIA 262/1:2003



Este ensayo trata de superar algunos de los problemas del ASTM 1202, esencialmente mediante la medición de la penetración real de cloruros en el concreto x_d .

NordTest NT BUILD 492:1999 y SIA 262/1:2013

- Después del ensayo (24 h) se parte el disco mediante el ensayo brasileño y se aplica un reactivo a base de AgNO_3 para revelar la zona de la probeta penetrada por los Cl^- (x_d).
- Ahora es posible calcular el coeficiente de migración de cloruros D_{Cl} en función de x_d según:



$$D_{\text{Cl}} = \frac{z}{t} (x_d - 1,5462 \sqrt{z x_d}) \quad [\text{m}^2/\text{s}]$$

$$\text{avec } z = 8,619 \cdot 10^{-5} \frac{hT}{U} \quad [\text{m}]$$

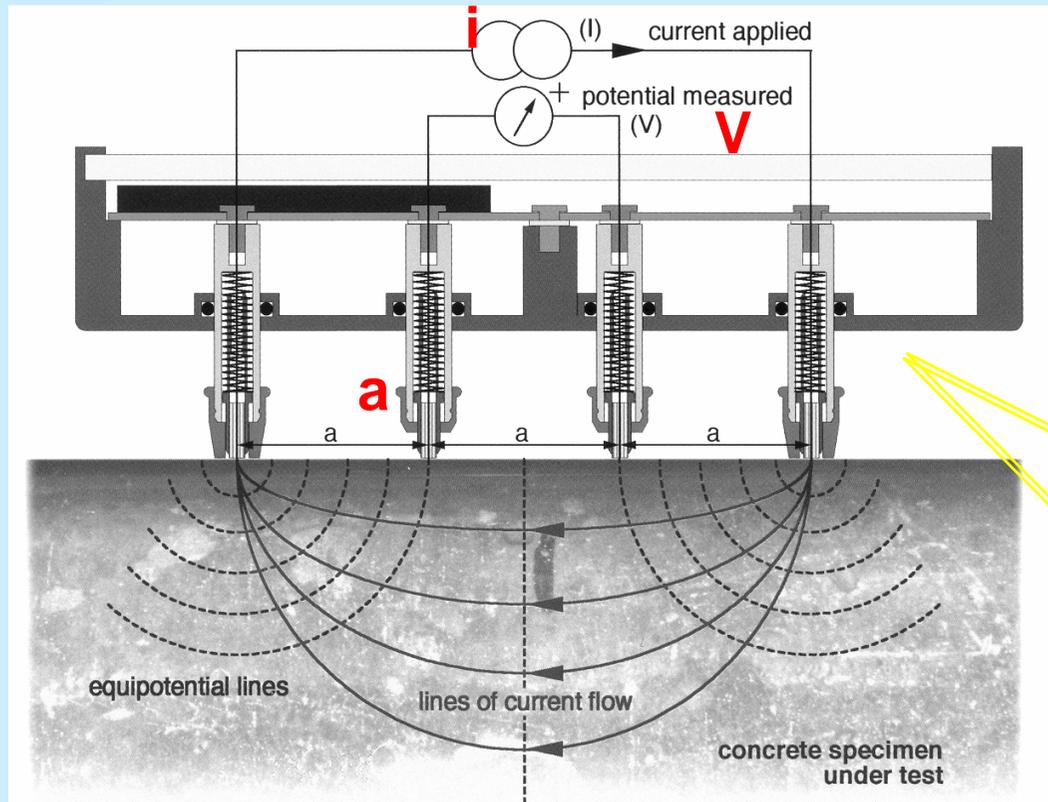
h = espesor del disco (m)

T = temperatura media de ambas soluciones ($^{\circ}\text{C}$)

U = valor medio del voltaje al inicio y al final del ensayo (V)

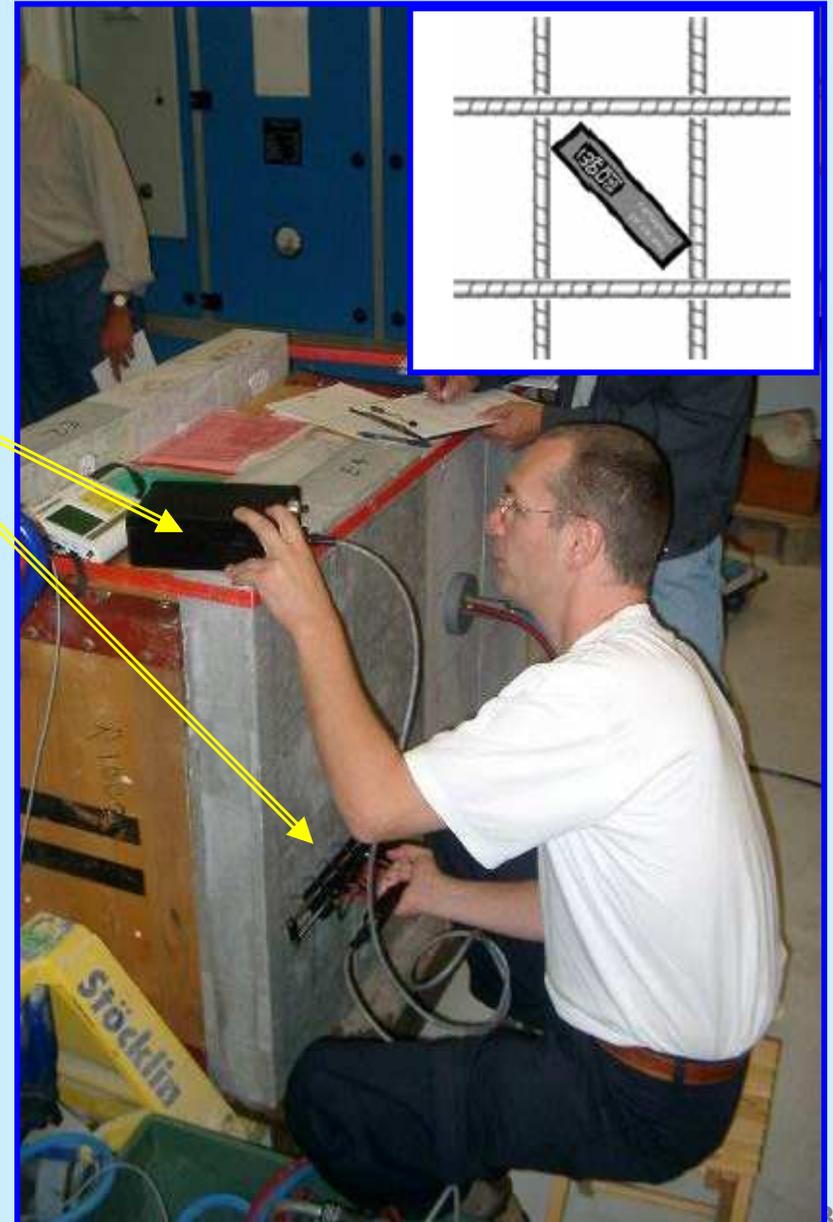
t = duración del ensayo (s)

Migración: Resistividad Eléctrica Wenner



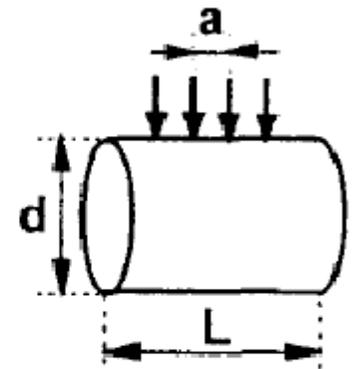
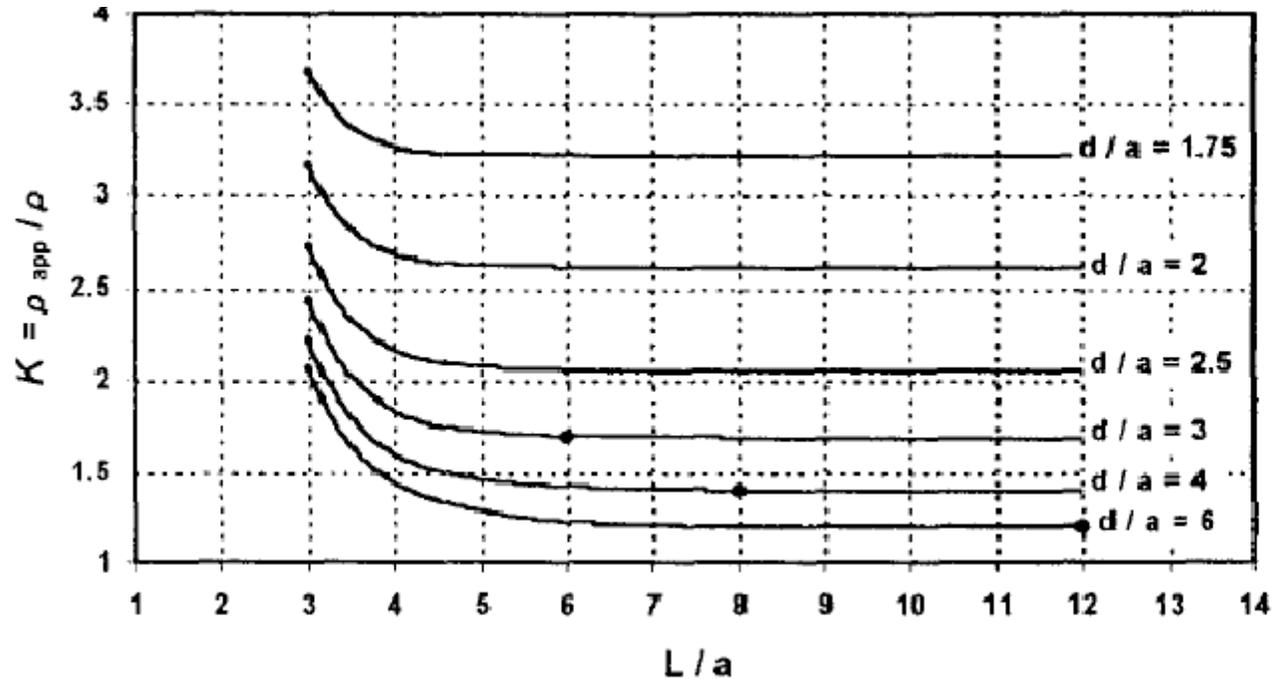
$$\rho = \frac{2 \pi a \cdot V / i}{K} \quad (\text{k}\Omega \cdot \text{cm})$$

K = geometric factor
Semi-infinite body: K = 1



Wenner Electrical Resistivity: Factor K cylinders

$d = 150 \text{ mm}; L = 300 \text{ mm}; a = 50 \text{ mm} \rightarrow d/a=3; L/a=10 \rightarrow K = 1.7$



Proposed
relation with
ASTM C1202

Chloride Ion Permeability	RCP Test Charged Passed (coulombs)	Surface Resistivity Test 28 day test kΩ-cm
High	> 4,000	< 12
Moderate	2,000-4,000	12 - 21
Low	1,000-2,000	21 - 37
Very Low	100-1,000	37 - 254
Negligible	< 100	> 254

Ref. [62, 64]

Wenner Electrical Resistivity Instruments



Resipod (Proceq)



Resitest 400 (Q-see man Int'l.)

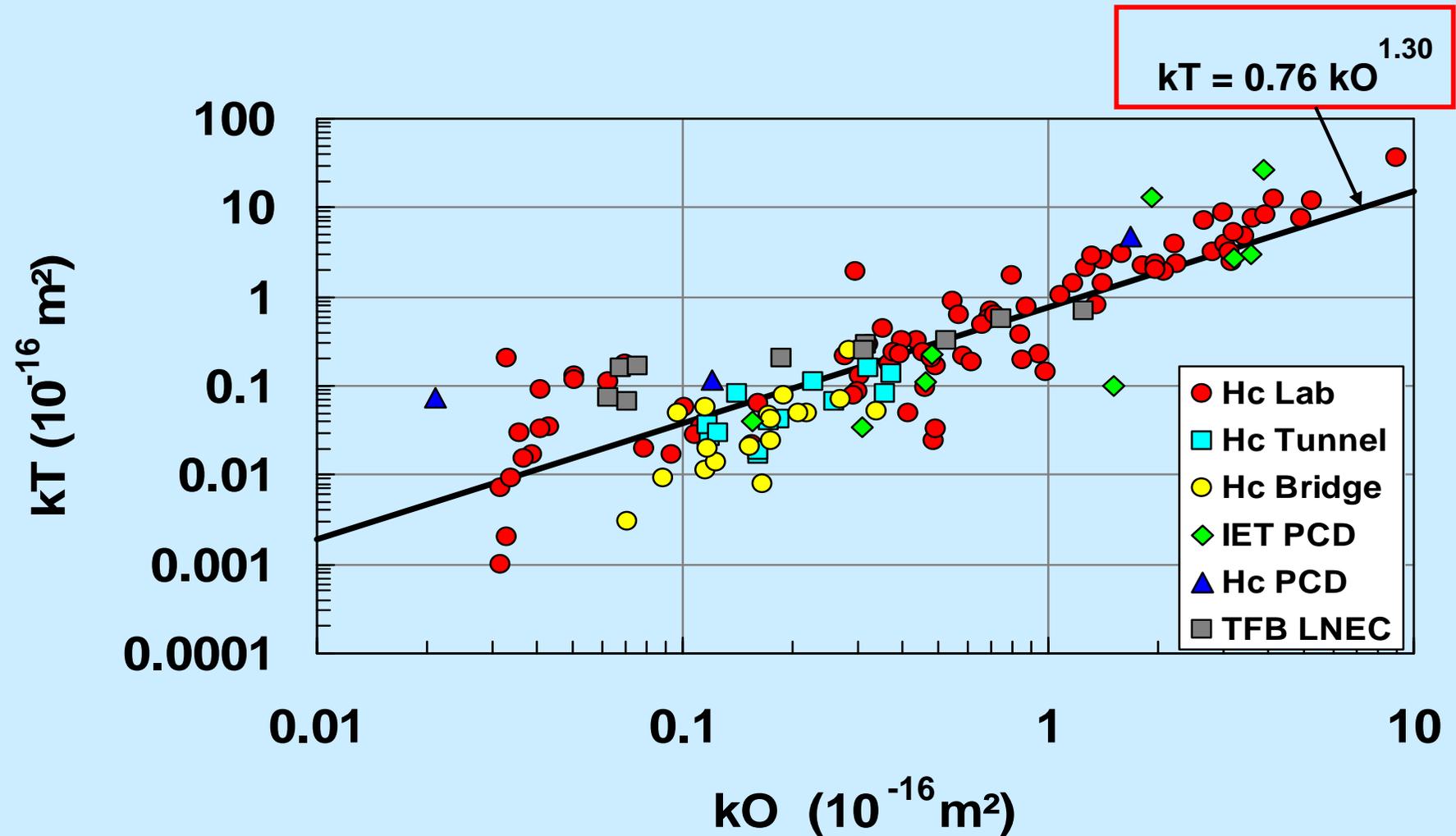
Relación entre Propiedades que miden la “Penetrabilidad” del Recubrimiento de Concreto

Los mecanismos de transporte dependen en gran medida de la estructura de poros del concreto, en particular de su volumen (ϵ) y tamaño (r_o).

Por ello, es común encontrar buenas correlaciones entre los parámetros que definen los distintos mecanismos de transporte.

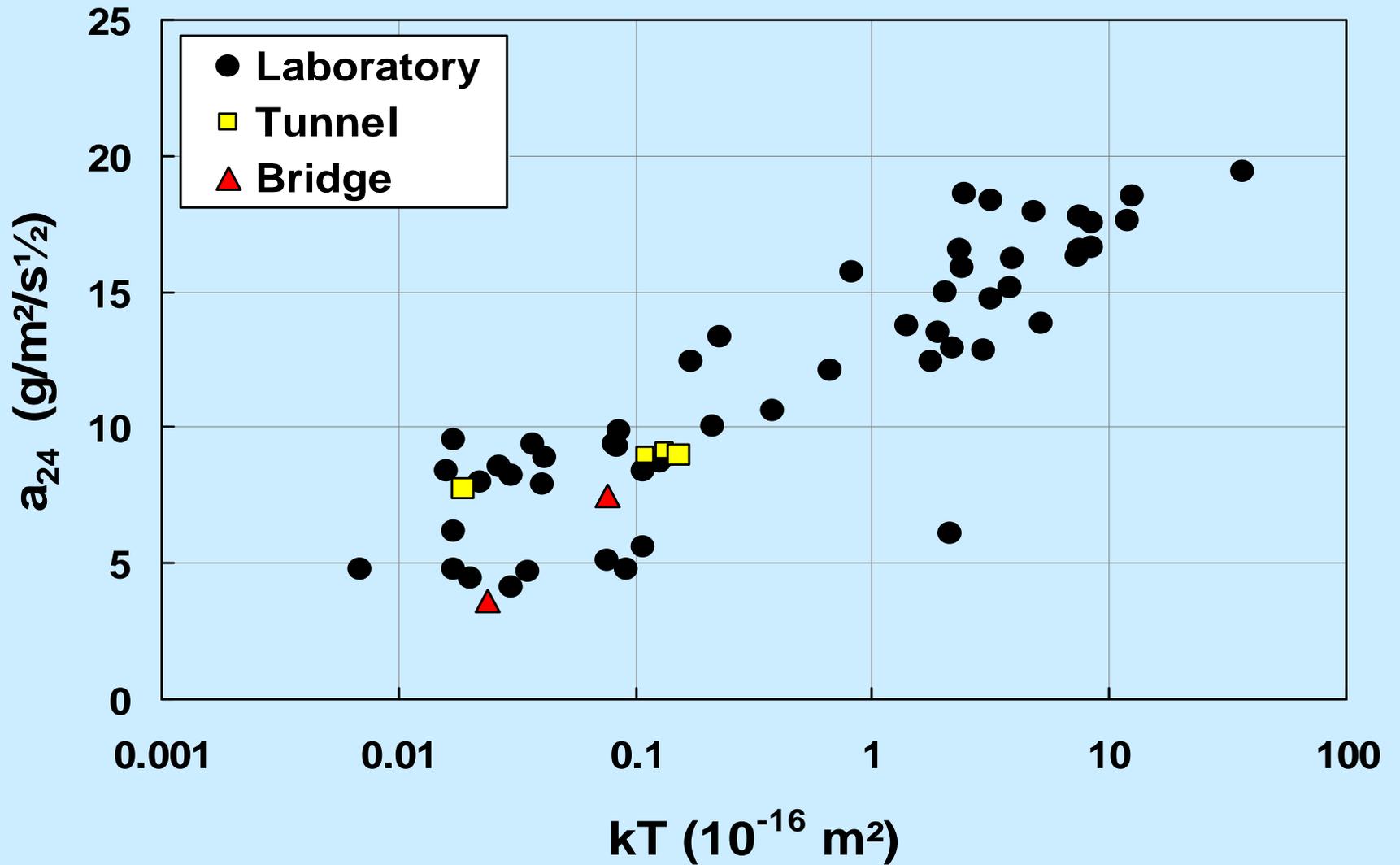
Esto abre la posibilidad de definir algunos parámetros de transporte, de fácil determinación, como indicadores globales de la “penetrabilidad” del recubrimiento.

Permeabilidad a Gases: kT vs RILEM-Cembureau kO

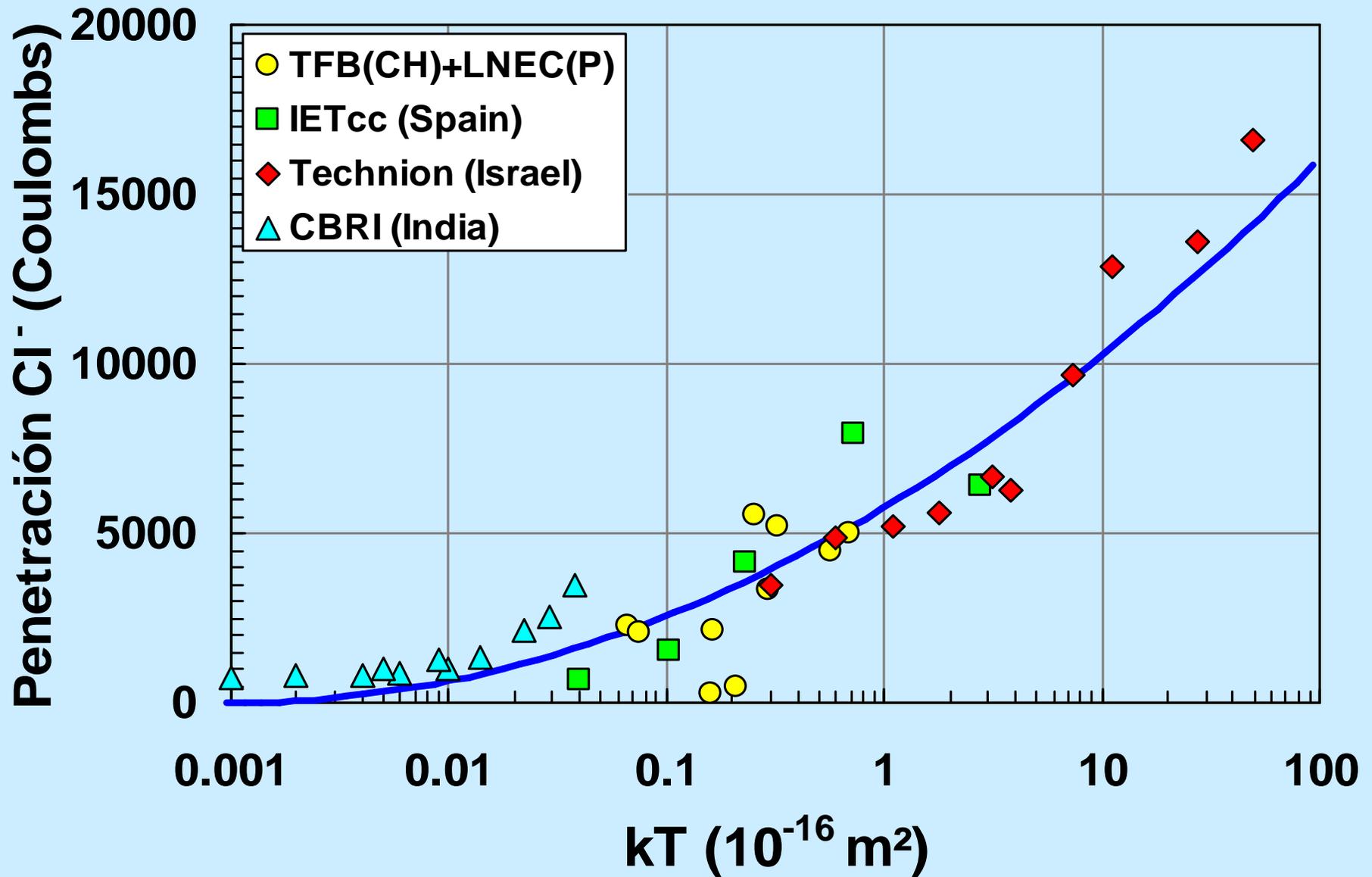


(N=135; $R^2=0.87$)

Permeabilidad a Gases vs Succión Capilar



Permeabilidad a Gases vs. Migración



Bibliografía Principal

- Kropp, J. and Hilsdorf, H.K. (Eds.), “Performance criteria for concrete durability”, RILEM Report 12, TC 116-PCD (Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability), E & FN Spon, London, 1995, 323 p.
- Torrent R. and Fernández Luco L. (Eds.), RILEM TC 189-NEC (Non-Destructive Evaluation of the Concrete Cover), Final Draft Report, 2006
- RILEM TC116-PCD (Permeability of Concrete as a Criterion of its Durability), Recommendations, "Measurement of the Gas Permeability of Concrete by the RILEM-CEMBUREAU Method“ and “Determination of the Capillary Absorption of Water of Hardened Concrete”, Mater. & Struct., v. 32, April 1999, pp. 174-179.
- RILEM TC 154-EMC, "Recommendation for the measurement of electrical resistivity", Mater. & Struct., v.33, Dec. 2000, pp. 603-611, (Section 6.6.2).
- M. Romer, RILEM TC 189-NEC "Non-destructive evaluation of the concrete cover": Comparative test - Part I: Comparative test of 'penetrability' methods, Materials and Structures, v. 38, n. 284, Dec. 2005, pp. 895 - 906.
- ASTM Standard C1202-97, "Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration".
- ASTM G57-95a, "Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method", 2001.
- Norma EN 12390-8, "Profundidad de penetración de agua bajo presión“, Versión Española, AENOR, 2001.
- NT BUILD 492:1999, "Chloride diffusivity in hardened concrete", Nordtest, 1999.
- British Standards Institution, "Methods of testing hardened concrete for other than strength", BS1881, Part 208, 1996.
- Standard SIA 262/1: 2013, "Concrete Structures - Supplementary Specifications" describes in several Annexes some tests related to transport mechanisms in concrete:
 - Annex A: Water sorptivity
 - Annex B: Resistance to Chlorides
 - Annex E: On Site Air Permeability

Bibliografía Complementaria

- Feliu S., Andrade C., González J.A. and Alonso C., "A new method for in-situ measurement of electrical resistivity of reinforced concrete", *Mater. & Struct.*, v. 29, July 1996, pp. 362-365
- Basheer, P.A.M., Long, A.E. and Montgomery, F.R., "The 'Autoclam' for measuring the Surface Absorption and Permeability of Concrete on Site", *CANMET / ACI Int. Workshop on Advances in Concrete Technology*, Athens, May 1992, pp. 107-132.
- Hong, C.Z. and Parrott, L.J., "Air permeability of cover concrete and the effect of curing", *British Cement Assoc. Report C/5*, October 1989, 25 p.
- Levitt, M., "An assessment of the durability of concrete by ISAT", *Proc. RILEM Symp. Durability of Concrete*, Prague, 1969.
- Millard, S.G., "Reinforced concrete resistivity measurement techniques", *Proc. Institution Civil Engineers*, part 2, March 1991, pp. 71-88
- Morris W., Moreno E.I. and Sagüés A.A., "Practical evaluation of resistivity of concrete test cylinders using a Wenner array probe", *Cem. & Concr. Res.*, v.26, n.12, 1996, pp. 1779-1787.
- Parrott, L. and Hong, C.Z., "Some factors influencing air permeation measurements in cover concrete", *Materials and Structures*, Vol. 24, 1991, pp. 403-408.
- Torrent, R., "A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site", *Mater. & Struct.* , v.25, n.150, July 1992, pp. 358-365.
- Torrent R., "On the tracks of the durability-meter", *L'Industria Italiana del cemento*, n. 752, March 2000, pp. 262-269
- Wenner, F., "A method for measuring earth resistivity", *Bulletin of the Bureau of Standards*, v.12, 1915, pp. 469-478