



Módulo 8

Ensayos de desempeño in situ



Luis Fernández Luco
Dr. Ing. Civil, UBA - INTECIN

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

WWW.IMCYC.COM

UN MUNDO DE SOLUCIONES
EN CONCRETO



Importancia de la caracterización del hormigón de recubrimiento

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

WWW.IMCYC.COM

UN MUNDO DE SOLUCIONES
EN CONCRETO





¿Por qué es importante el hormigón de recubrimiento?

- **Constituye la barrera** físico-química para frenar el ingreso de agresivos para el hormigón o las armaduras
- El **recubrimiento** un **factor de diseño** de fácil manipulación
- **Existe equipamiento para la medida de su espesor** en condiciones reales de obra (pachómetros)
- **No está representado por el hormigón del interior** de los elementos ni por probetas moldeadas.
- **Su calidad** puede asociarse a **indicadores** basados en la **capacidad de transporte de fluidos**



Valoración de la calidad (penetrabilidad)

Valoración del espesor





Métodos no destructivos para la valoración de la calidad del hormigón de recubrimiento



Métodos de medida del transporte que valoran la penetrabilidad del hormigón

- **Permeabilidad al agua (Absorción Capilar)**
- **Permeabilidad a los gases**
- **Difusión y migración de iones**





Métodos de medida del transporte que valoran la penetrabilidad del hormigón

- Permeabilidad al agua
 - Permeabilidad a los gases
 - Permeabilidad al aire
 - Absorción Capilar
 - Difusión y migración de iones
- Intrusivos**

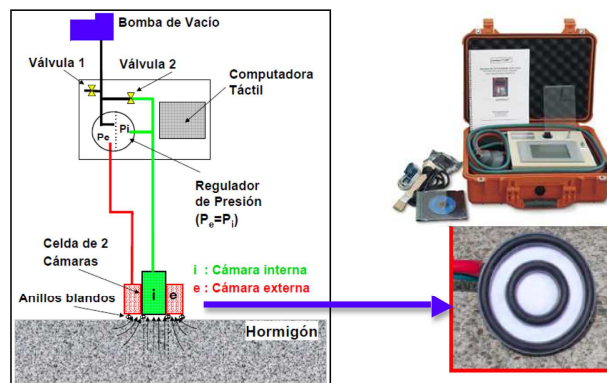
Superficiales

Simple cámara

Doble cámara



Fundamentos de la medida de permeabilidad al aire con el Permea-TORR



imcyc

Ventajas de la doble cámara

Flujo unidireccional hacia la cámara interna

Hormigón

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

imcyc

Aplicación de la Ec. de Poiseuille

Para 1 poro $q = \frac{\pi \cdot r_o^4 \cdot \Delta P}{\mu \cdot 8 \cdot L}$

Para n poros $Q = n \cdot \frac{\pi \cdot r_o^4 \cdot \Delta P}{\mu \cdot 8 \cdot L}$

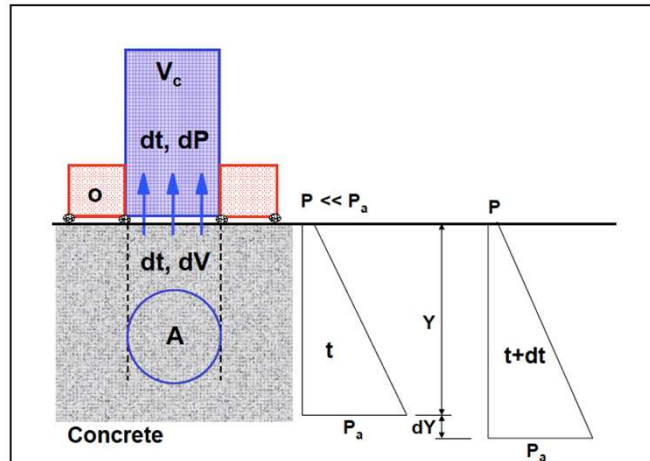
Porosidad $\varepsilon = \frac{n \cdot \pi \cdot r_o^2}{A}$

$Q = \frac{\varepsilon \cdot r_o^2 \cdot A \cdot \Delta P}{8 \cdot \mu \cdot L}$

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



Esquema del ensayo y principio del método



Ecuación que rige la medida de la permeabilidad al aire

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

- kT : coeficiente de permeabilidad al aire [m^2]
- V_c : volumen de la cámara interior [m^3]
- A : área de la cámara interior [m^2]
- μ : viscosidad dinámica del aire [Ns/m^2]
- ε : porosidad del hormigón [-]
- p_a : presión atmosférica [N/m^2]
- p_0 : presión en la cámara int. al inicio del ensayo $t_0 = 60$ s [N/m^2]
- p : presión en la cámara int. al final del ensayo t ($t \leq 720$ s) [N/m^2]

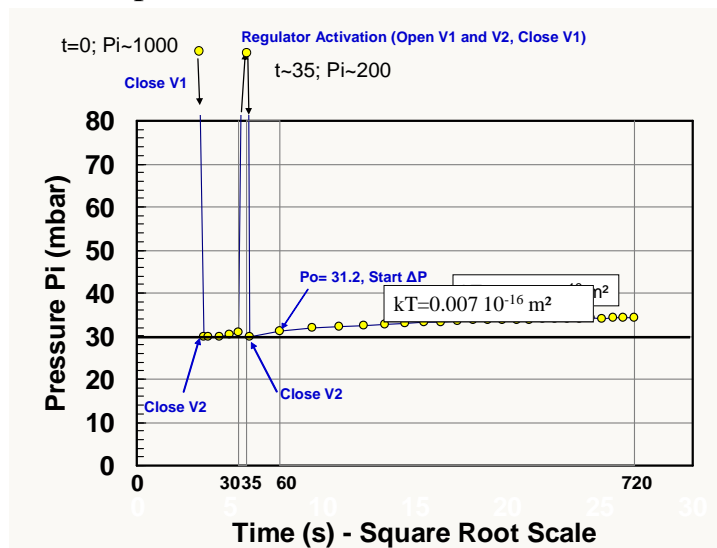


Hipótesis sobre las que se apoya el equipo

- La presión en ambas cámaras se mantiene igual durante el ensayo.
- Se eliminan corrientes espurias y el flujo radial en el cilindro proyección de la cámara interna.
- Cómo el flujo es unidimensional, el área es constante y en consecuencia, se puede calcular kT a través de la gráfica $\Delta P vs \sqrt{t}$



Operation of the *PermeaT^{ORR}*



imcyc

Pantalla que se muestra al finalizar el ensayo

kT Test $\epsilon=0.05$ $\mu=2.00$ $P_c=30\text{mbar}$

Test # 030 Time(s) 720 Temp (°C) 30.8 Lmax=100mm

Pi (mbar) Pe (mbar) kT (10⁻¹⁶ m²) 0.019

38.1 38.9

ΔP_i (mbar) 7.4 L (mm) 10

See P- t^{0.5} L > e?

Test Info ABORT STORE

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

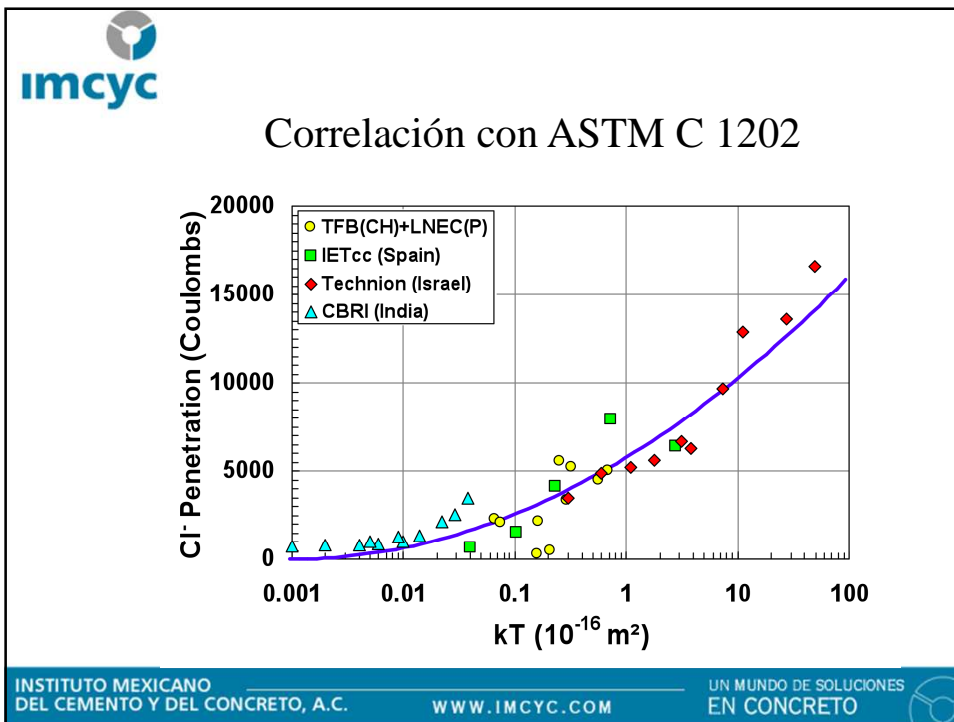
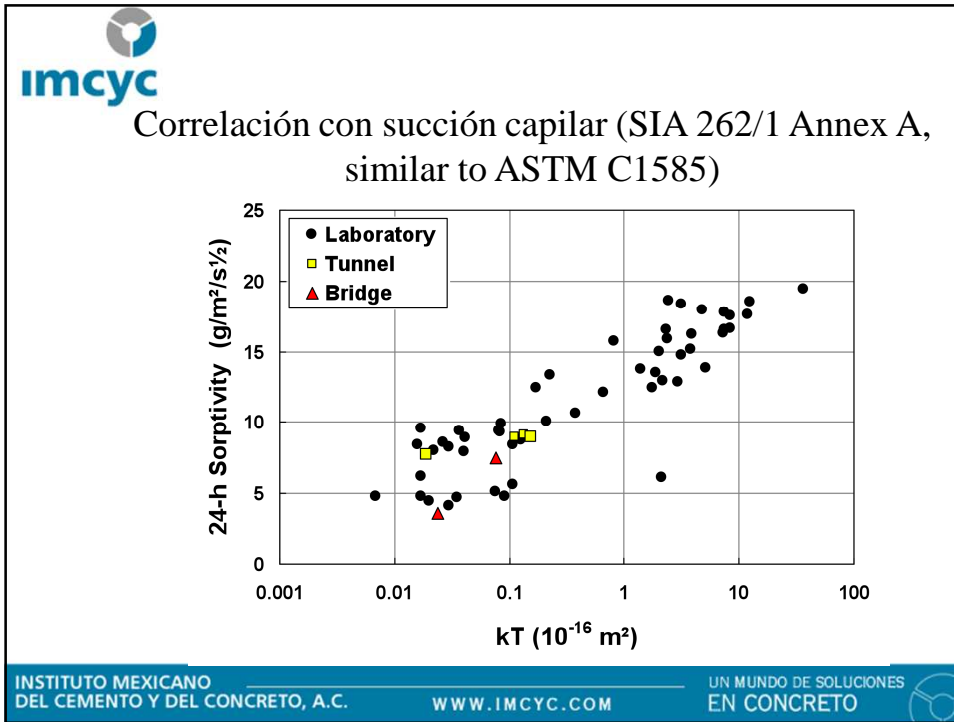
imcyc

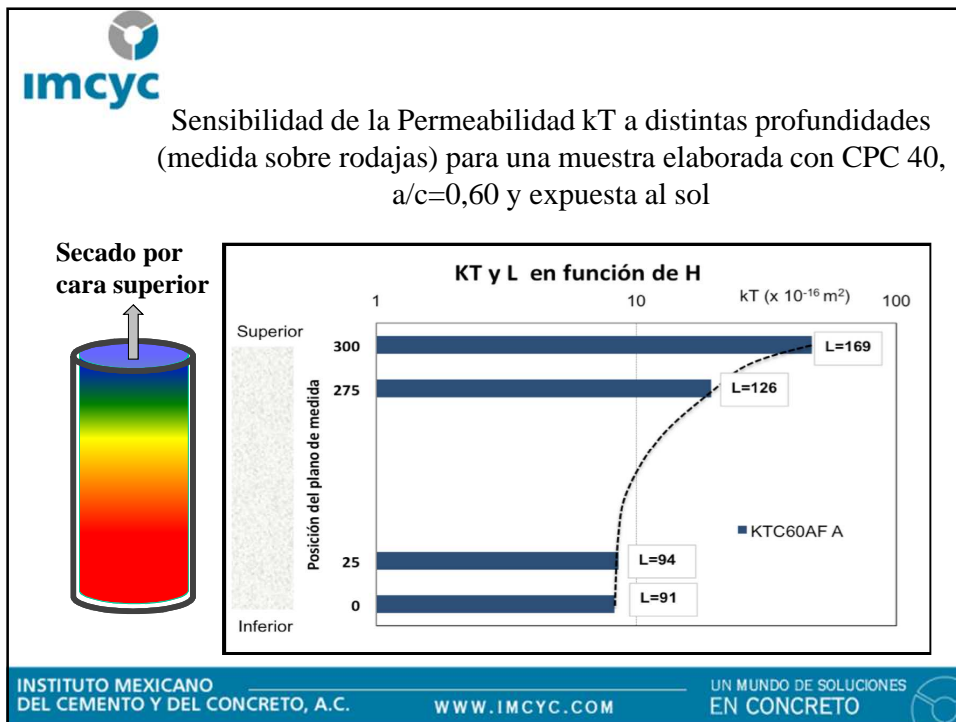
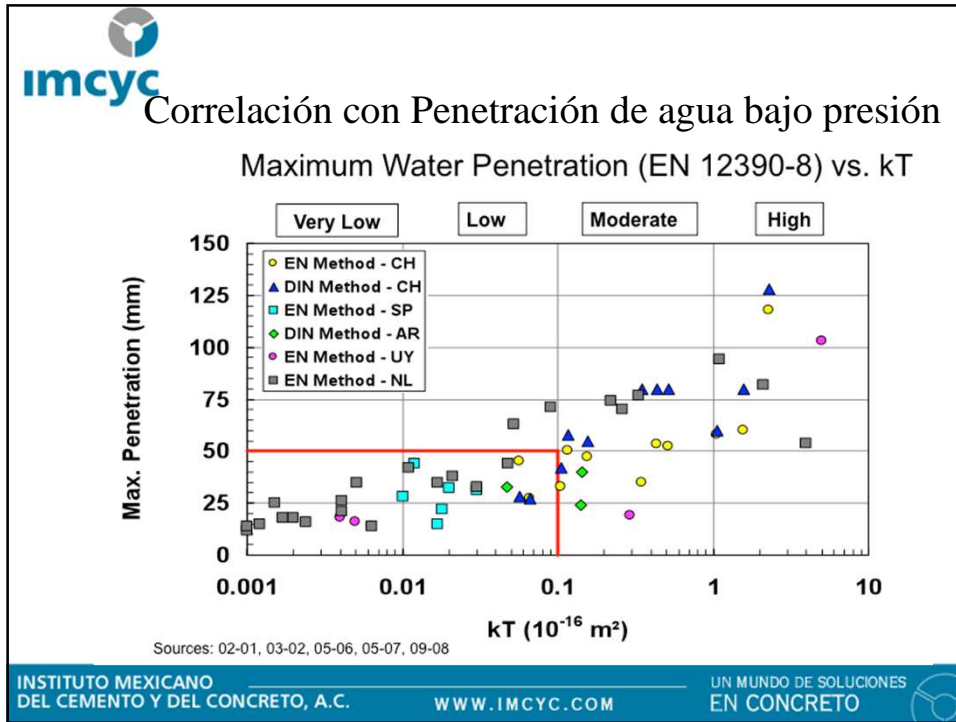
Vista de la pantalla durante el ensayo (información en tiempo real)

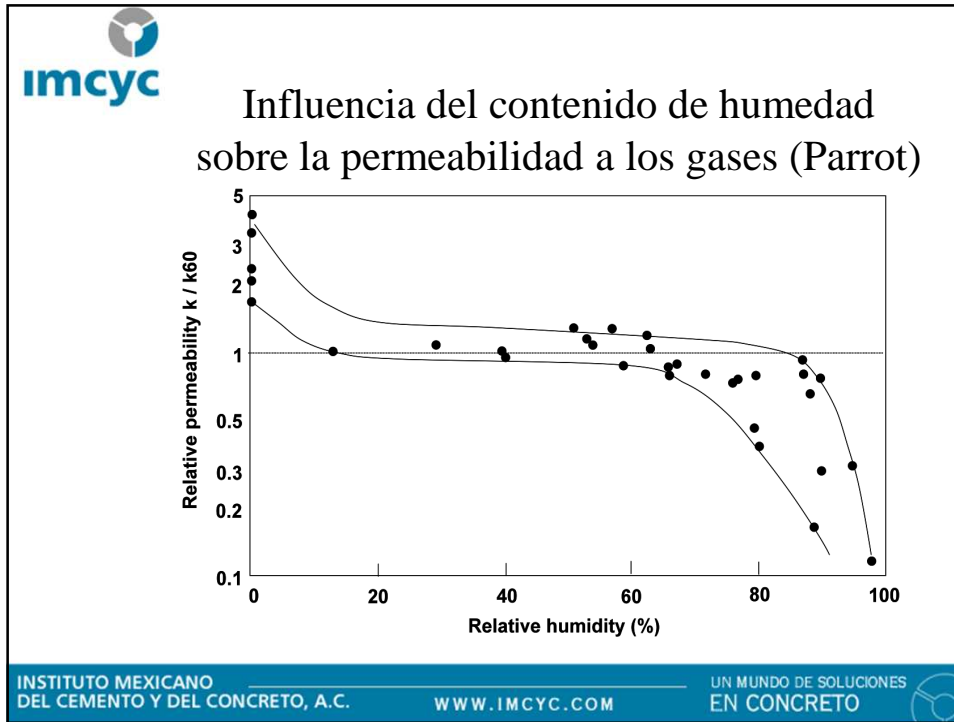
The graph plots ΔP_{eff} (mbar) on the y-axis (0 to 40) against $t_{1/2} - t_{o1/2}$ (s^{1/2}) on the x-axis (0 to 20). Several linear data series are shown, with a red line labeled '2.0' and a green circle at approximately (18, 20). A blue dotted line with '+' markers is also visible.

ACCEPT kT6 Back

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







MÉTODOS BASADOS EN EL TRANSPORTE DE AGUA

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

imcyc

Métodos que involucran el transporte de agua: Succión capilar por método ISAT

Reservoir
Tap
Inlet
Outlet
sample

20 40 60 80 100 120 140 160 180 200

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

imcyc

Correlación entre ensayo de ISAT y succión capilar (mét. Fagerlund)

Water absorption after 1h @ 28 days (kg/m²)	ISAT-10 (ml/m²/s)
0.1	0.0
0.2	0.0
0.3	0.05
0.4	0.05
0.6	0.2
0.7	0.2
0.9	0.55
1.1	0.48
1.4	0.48
1.8	0.65

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

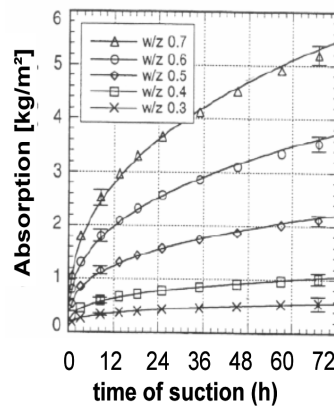
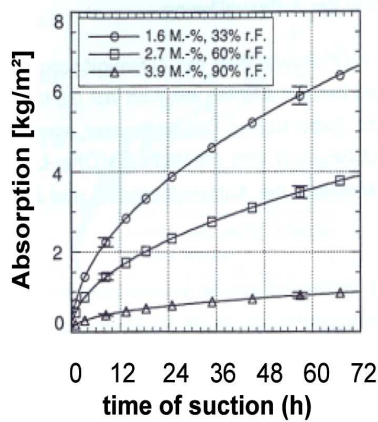


Escalas de absorción según valores de ISAT

Absorción (succión) del Hormigón	Tiempo desde el inicio del ensayo			
	10 min	30 min	60 min	120 min
Alta	> 0.50	>0.35	>0.20	>0.15
Media	0.25-0.50	0.17-0.35	0.10-0.20	0.07-0.15
Baja	<0.25	<0.17	<0.10	<0.07



Influencia de a/c y contenido de humedad sobre la succión capilar





MÉTODOS BASADOS EN LA MIGRACIÓN DE IONES

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

WWW.IMCYC.COM

UN MUNDO DE SOLUCIONES
EN CONCRETO



Aplicación “in situ”

Método Permit ®

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

WWW.IMCYC.COM

UN MUNDO DE SOLUCIONES
EN CONCRETO






Método Permit



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



Métodos de aplicación en condiciones de laboratorio

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



Métodos de migración de cloruros

Nombre	Tipo de ensayo	Condiciones experimentales	Resultados
ASTM C 1202	CELDA ELECTROLÍTICA	60 V 6 horas	Coulombs
NT Build 492		30 V Algunos días	Dns
Multirégimen UNE 83991		12 V Varios días	Ds ; Dns, Factor retardo




Método de ASTM C 1202



Variabilidad

Muestras del mismo pastón, mismo operador: 42 %

Reproducibilidad: 51 %

 **ASTM C 1202 - Rapid Chloride Permeability Test**

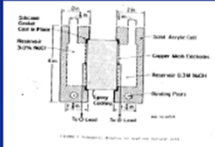
NORTE AMÉRICA

Rapid chloride permeability (ASTM C1202) 1997

Principales aspectos:

Dispositivo de la "celda"

- Mecanismo de la migración
- Duración 6 HORAS
- Variable respuesta: La carga eléctrica que pasa por la muestra de hormigón, en Coulombios (C)





Desventajas:

- Medida cualitativa de la penetración de cloruros
- No se obtiene Dap de interés
- Alto valor de potencial aplicado (60V) y muy corto periodo de tiempo


Ventajas:

- Probeta o testigo
- Sencilla aplicación y muy conocido
- Califica el hormigón según la permeabilidad, aunque no es cuantificable

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

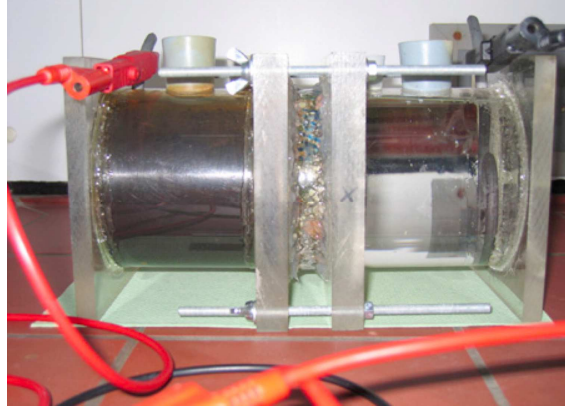
 **Método de ASTM C 1202**

Carga que pasa (6 h) (Coulombs)	Permeabilidad a los cloruros	Situación típica para
> 4000	Alta	H ^o de cemento portland, alta relación a/c (> 0,60)
2000 – 4000	Moderada	H ^o de cemento portland de moderada a/c (0,40 – 0,50)
1000 – 2000	Baja	H ^o de cemento portland de baja relación a/c (< 0,40)
100 – 1000	Muy baja	Hormigón modificado con latex o con impermeabilización interna
< 100	Despreciable	Hormigón polímero u Hormigón impregnado con polímero

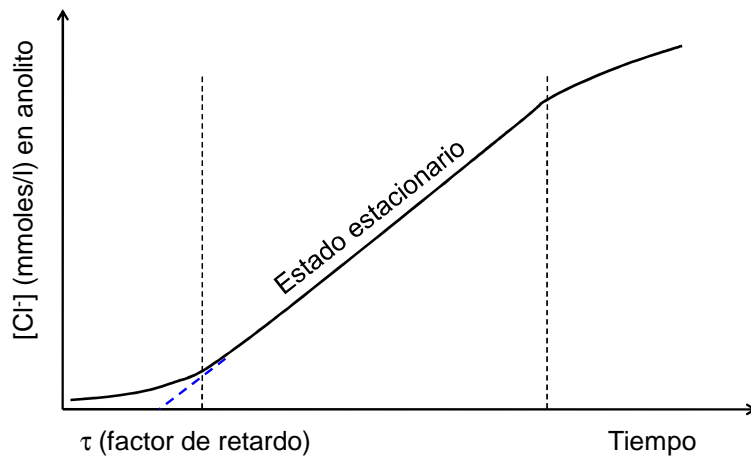
INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, A.C. WWW.IMCYC.COM UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO 



Método multirégimen



Método multirégimen



imcyc

NT Build 492

EUROPA – PAÍSES NÓRDICOS

Migration test (Nordtest NT Build 492) 1999

Principales aspectos:

Dispositivo de la "celda"

- Mecanismo de la migración
- Duración de 6 a 96 Hs
- Variable respuesta: Coeficiente de difusión (D) calculado función del frente de penetración de Cl⁻

Desventajas:

- Alto valor de potencial aplicado (30V) y muy corto periodo de tiempo
- Dispositivo complejo
- Dudoso valor de D obtenido por el uso de indicador colorimétrico para análisis del frente de cloruros. Se observa en estudios falta de correlación frente al valor crítico de Cl⁻

Ventajas:

- Probeta o testigo
- Corto periodo ensayo




$$D_{\text{norm}} = \frac{RT}{zFE} \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t}$$

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

imcyc

MÉTODOS BASADOS EN LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA




Medidas de resistividad eléctrica por Mét. de las 4 puntas, con distancia variable entre puntas

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



Relación entre resistividad y coef. de difusión – Relación de Einstein

$$D_{eff} = \frac{k_{cl}}{\rho_{sat}} = k_{cl} \cdot \sigma$$

D_{eff} = Coeficiente de difusión efectivo para los iones cloruro en solución

k_{cl} = parámetro experimental que depende de la concentración


ρ_{sat} = resistividad del hormigón saturado

σ = conductividad del hormigón saturado



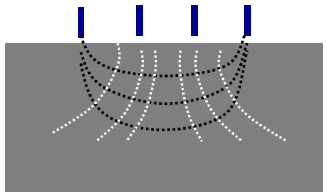
Condición de exposición	Hormigón de cemento portland (CPN)	Hormigón de cemento con Escoria de AH (>65 %) o Ceniza volante (>25 %) o Humo de Sílice (>5 %)
Muy húmedo, sumergido, zona de salpicaduras o cámara húmeda	50 - 200	300 - 1000
Al exterior, expuesto	100 - 400	500 - 2000
Al exterior, protegido de la lluvia, recubierto, hidrofobado, no carbonatado (20°C / HR 80 %)	200 - 500	1000 - 4000
Idem + carbonatado Ambiente interior (carbonatado) (20°C / HR 50 %)	1000 y superior 3000 y superior	2000 - 6000 y superior 4000 - 10000 y superior





Medida de la resistividad por método de las 4 puntas

a



$\rho_{app} = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R$


Válida para medio semi-infinito y homogéneo

- Es necesario estimar el factor K (aspectos geométricos)

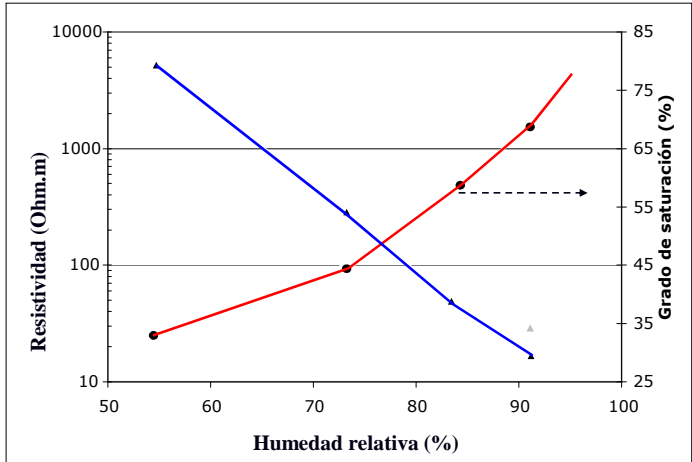
$$\rho_{app} = \rho \cdot K$$

- Se consideró la existencia de un medio no homogéneo
- Se valoró la influencia de la separación de electrodos sobre la profundidad de las líneas de corriente

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

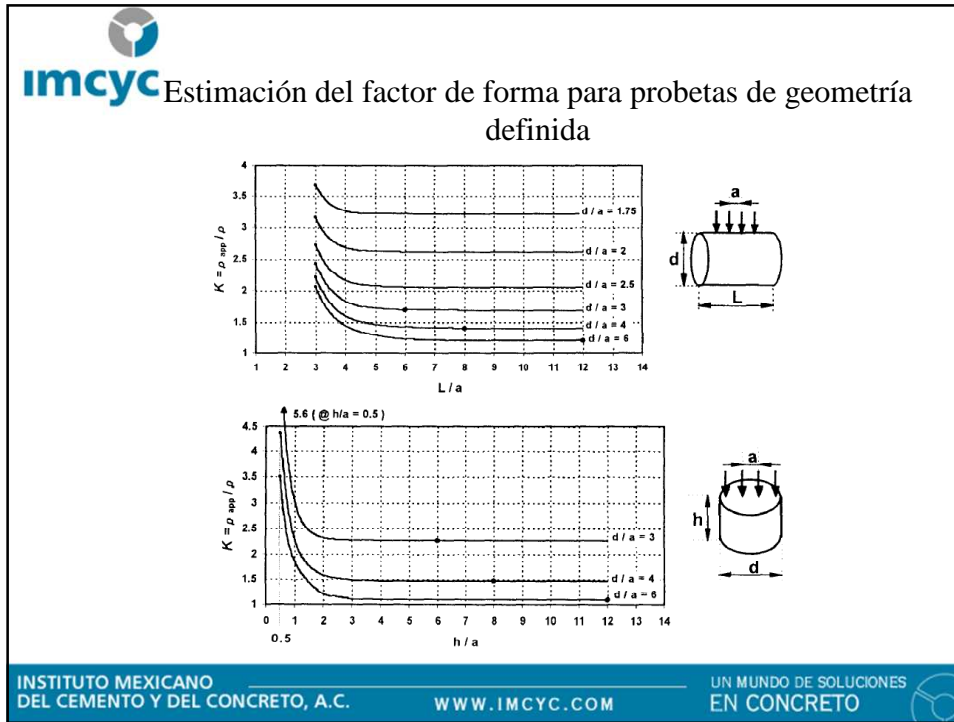


Influencia del contenido de humedad sobre la resistividad



Humedad relativa (%)	Resistividad (Ohm.m)	Grado de saturación (%)
55	~4000	~30
75	~100	~45
85	~30	~55
95	~10	~75

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



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

WWW.IMCYC.COM

UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO

Medida del espesor de recubrimiento

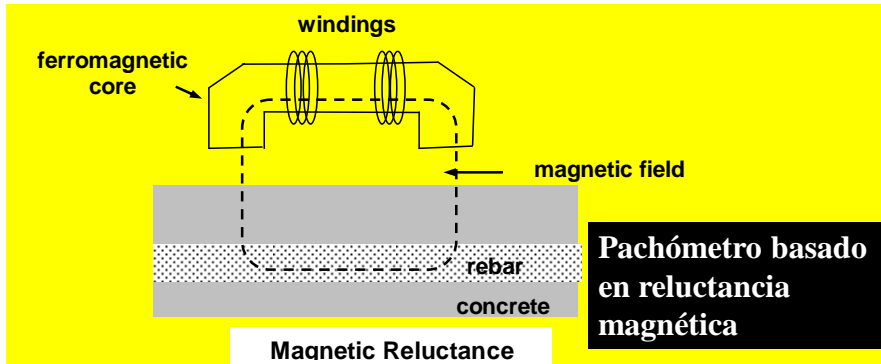
Medida del espesor de recubrimiento

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

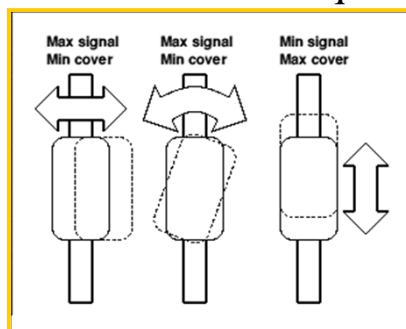


Tipos básicos de pachómetro

a) reluctancia magnética




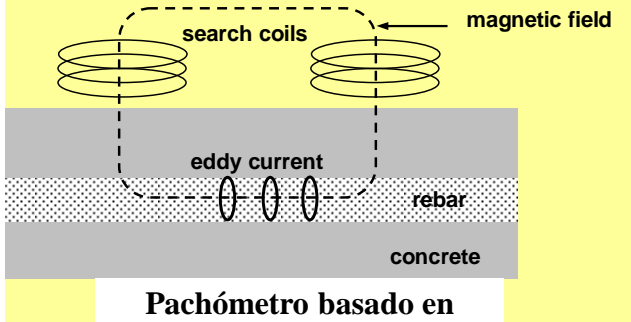
Factores que afectan la localización



La relación entre señal obtenida y el recubrimiento no es simple pero podría asimilarse a una ley inversa a la cuarta o sexta potencia, dependiendo de la metodología empleada


Como se trata de la medida de pequeños cambios en la característica de la señal (que está siempre presente y sólo se incrementa levemente por la presencia de la armadura), está muy afectada por el efecto de la temperatura o campos magnéticos externos sobre el núcleo, así como por la presencia de agregados magnéticos en el hormigón.


 Tipos básicos de pachómetro
b) Conductividad eléctrica (corrientes de Eddy)




Pachómetro basado en conductividad eléctrica

Técnicas de pulso separan la señal emitida de la recibida y no hay señal si no hay una barra, lo que le confiere estabilidad a la técnica. La señal se incrementa con el incremento del diámetro de la barra y su cercanía al instrumento, es decir, con la disminución del recubrimiento.

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

 Diferentes procedimientos para determinar el espesor del recubrimiento

- Espaciador + método de diferencias
- Espaciador + cociente entre valores
- Método ortogonal – iterativo
- Método ortogonal – cociente entre señales
- Método del perfil transversal

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



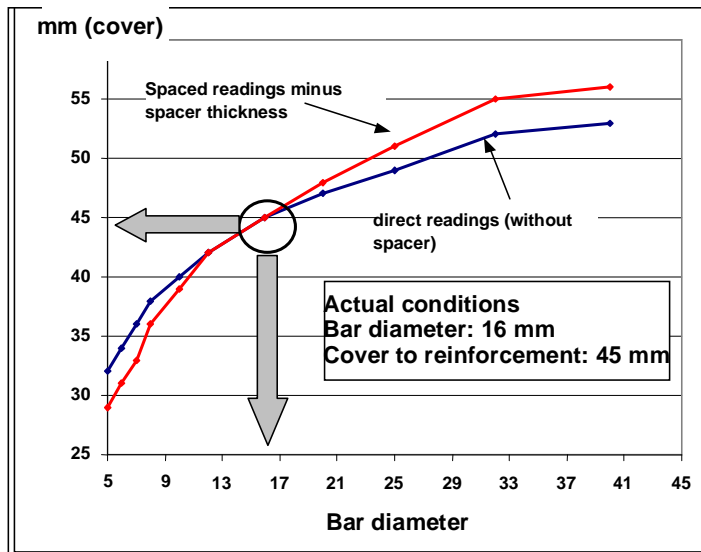
Espaciador, método de las diferencias

Setting of diameter control	Indicated cover	Indicated cover	Difference
	(direct)	(spaced)	(col 2 - col 3)
6	34	61	27
7	36	63	27
8	38	66	28
10	40	69	29
12	42	72	30
16	45	75	30
20	47	78	31
25	49	81	32
32	52	85	33

El espesor del espaciador es 30 mm

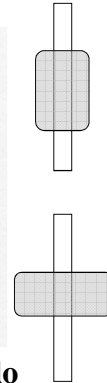
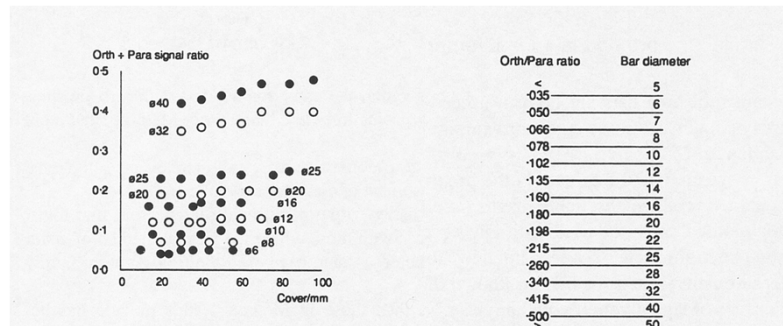


Espaciador, método de las diferencias





Método ortogonal, relación entre lectura paralela y normal

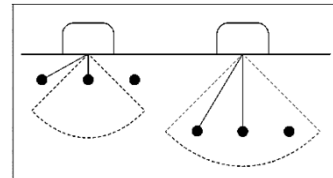


Se dispone de instrumentos precalibrados. El usuario sólo tiene que seleccionar el diámetro de la barra y el recubrimiento aparece en la pantalla.



Dependencia de factores externos

- Variaciones en el espesor del separador
- Efecto de barras vecinas
- Barras apareadas – empalmes
- Composición del hormigón
- Efecto de temperaturas extremas
- Proximidad al extremo de la barra
- No está afectado por la humedad relativa en el interior del hormigón



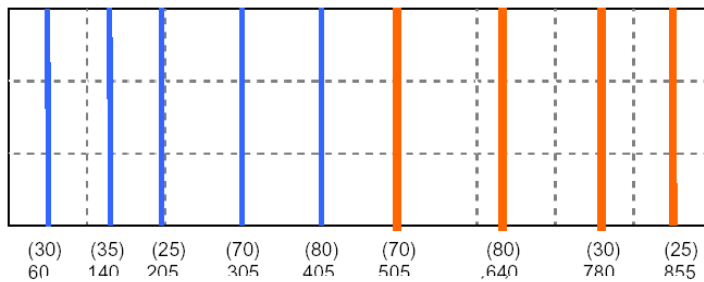


Resultados del ensayo comparativo de equipos comerciales

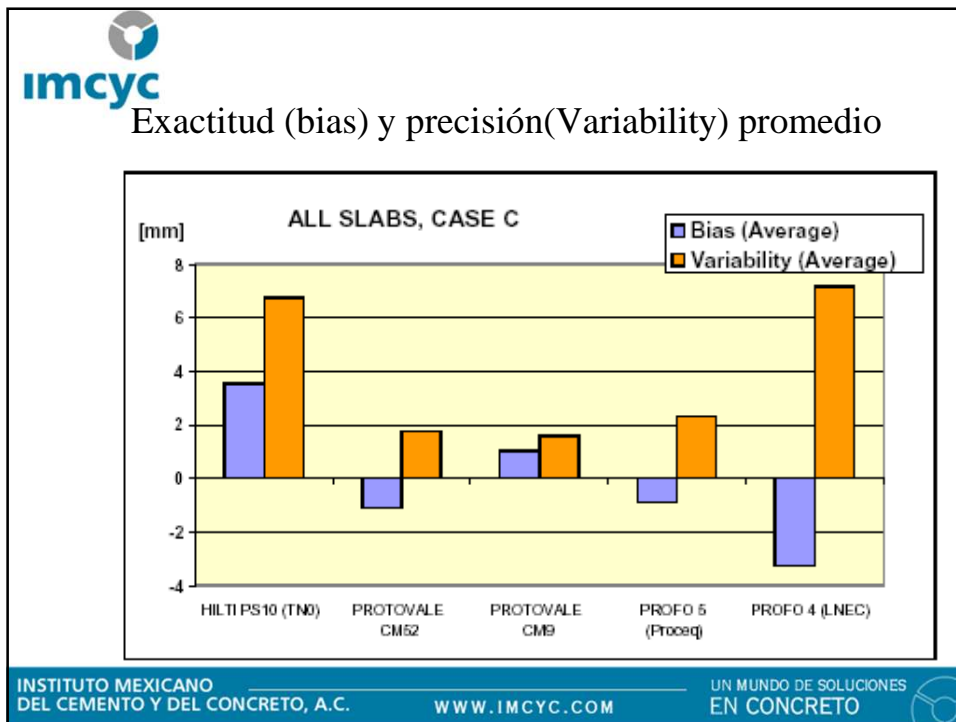
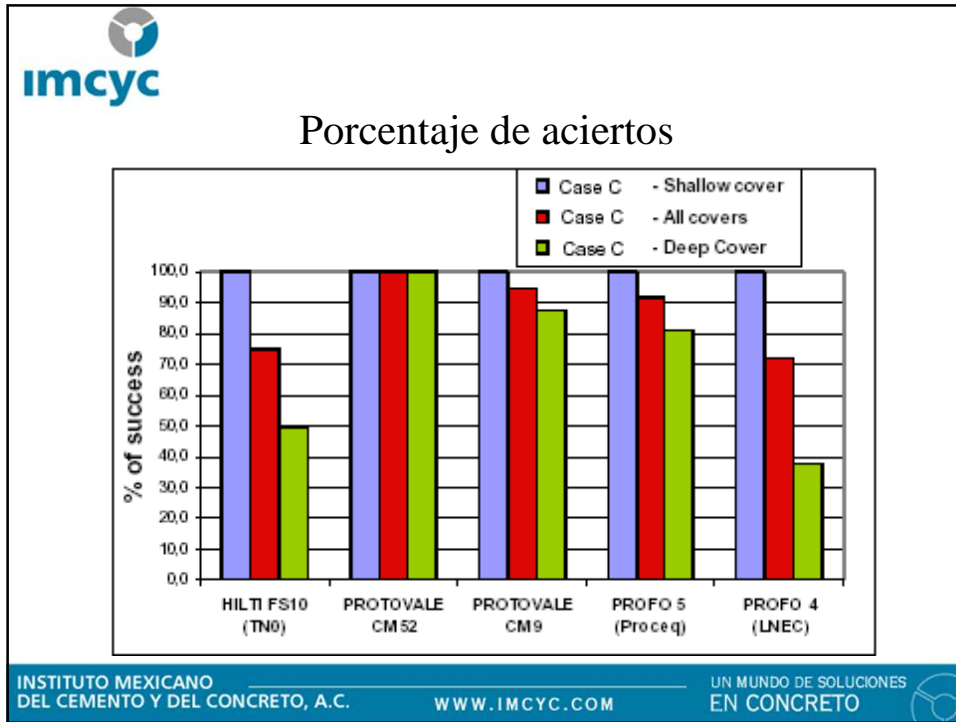
Comité Técnico TC-189 NEC – Non-destructive evaluation of covercrete



Esquema de armado y condiciones de las mediciones

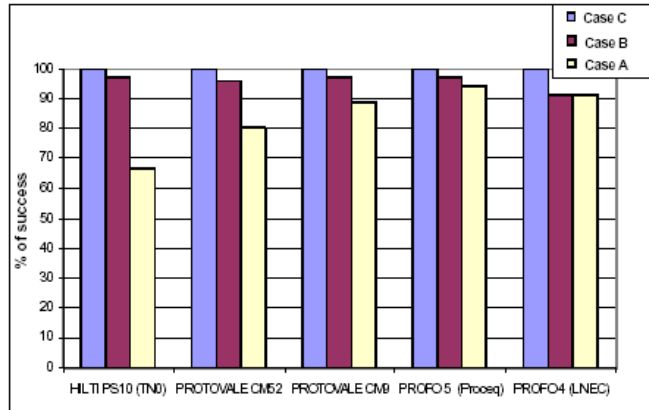


	w/c	Temperature (°C)	Moisture condition
Slab M	0.55	20	Dry
Slab R	0.55	10	Dry
Slab S	0.40	20	Dry
Slab T	0.55	20	Moist





Influencia del conocimiento previo (diámetro de barras y ubicación estimada) cuando el recubrimiento es bajo (inferior a 40 mm)



RILEM TC 230-PSC. VENLO APPLICATION TESTS



Dr. Luis Fernández Luco
Secretario del Comité Técnico



BAS R&T preparó paneles construidos con hormigón de distintas clases resistentes y con dos tipos de cemento: portland y con adición de cenizas volantes




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

Características de los hormigones

Mezcla	Tipo de cemento	a/c	Panel	Curado
A	CEM I 52,5 N	0,439	1	1 día en el molde
			2	+7 días cubierto por film
B	CEM I 52,5 N	0,537	3	1 día en el molde
			4	+7 días cubierto por film
C	CEM II/B-V	0,396	5	1 día en el molde
			6	+7 días cubierto por film
D	CEM II/B-V	0,586	7	1 día en el molde
			8	+7 días cubierto por film

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




Participantes

<ul style="list-style-type: none"> • Dr. Sree Nanukuttan • Mr. Pej Pouryahya • Dipl. Ing. Marijana Serdar • Dr. Kei-ichi Imamoto • Prof. Kishi • Dr. Okazaki Shinichiro • Prof. Ujike Isao • Dr. Hayashi-Kazuhiko • Mr. Komatsu-Satoshi • Ms. Misumi Ai • Mr. Peter Paulini • Mr. Dix • Dr. Roberto Torrent • Dr. Hans Beushausen • Mr. Simon Starck • Mr. Dimitrios Boubitsas • Dr. Luis Fernández Luco • Mr. J. Gulikers • Dr. Frank Jacobs 	<p>Queen's University Belfast, North Ireland</p> <p>Queen's University Belfast, North Ireland</p> <p>University of Zagreb, Croatia</p> <p>Tokyo University of Sciences, Japan</p> <p>University of Tokyo, Japan</p> <p>Ehime University, Japan</p> <p>Ehime University, Japan</p> <p>Yokohama National University, Japan</p> <p>Yokohama National University, Japan</p> <p>Yokohama National University, Japan</p> <p>University Innsbruck, Austria</p> <p>University Innsbruck, Austria</p> <p>Materials Advanced Services Ltd, Argentina</p> <p>University of Cape Town, South Africa</p> <p>University of Cape Town, South Africa</p> <p>Chalmers University of Technology Sweden</p> <p>Universidad de Buenos Aires, Argentina</p> <p>Rijkswaterstaat, The Netherlands</p> <p>TFB, Switzerland</p>
--	--

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



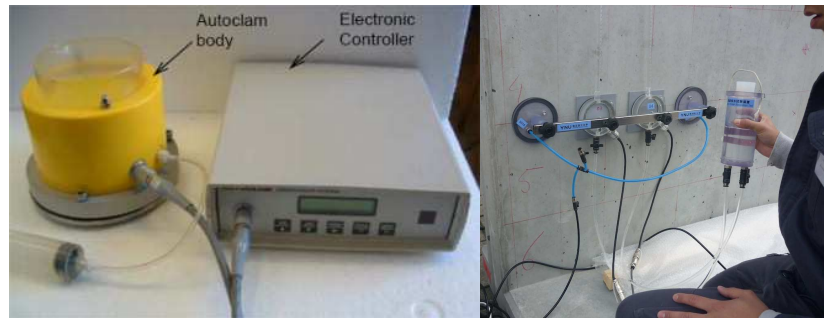

Ensayos basados en la permeabilidad a los gases (aire)



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



Ensayos basados en la succión capilar (agua)



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

WWW.IMCYC.COM

UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO





Ensayos basados en la conductividad iónica / resistividad eléctrica del hormigón




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


WWW.IMCYC.COM

UN MUNDO DE SOLUCIONES EN CONCRETO



Los resultados estarán disponibles en
el informe del TC -230 PSC

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



Gracias por su atención

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