



# Metodología simple de Especificación y Control de Hormigones por Durabilidad

Dr.-Ing. Luis Ebensperger M.





- I. Factores a considerar en un Diseño por Vida Útil
- II. Descripción del Método de Permeabilidad al Aire según Norma Suiza 262/1-E
- III. Metodología Exp-Ref (Experimental-Referencial)
- IV. Aplicación práctica del Método
- V. Conclusiones



I.

# Factores a considerar en un Diseño por Vida Útil





# Diferencias entre Hormigón de Laboratorio y Calidad Real del Hormigón en Obra

Efectos agresivos:

$\text{CO}_2$   $\text{Cl}^-$   $\text{SO}_4^{2-}$ , Abrasión, Hielo/deshielo



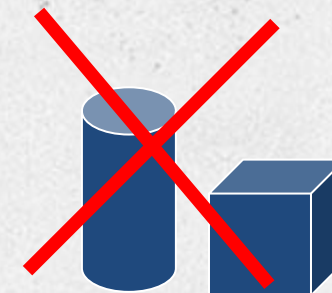
Recubrimiento de  
peor Calidad, más  
permeable

Debido a:

- Segregación
- Compactación
- Curado
- Exudación
- Acabado Superficial
- Microfisuras



## Control



**Probetas  
moldeadas, y  
curadas en  
condiciones  
normalizadas, NO  
representan la  
calidad real del  
recubrimiento del  
hormigón.**

[WWW.CONGRESOEXPOHORMIGON.CL](http://WWW.CONGRESOEXPOHORMIGON.CL)



# Efectos sobre el Hormigón del Recubrimiento

Resistencia del Hormigón frente a ataques externos:



# Condiciones ambientales que afectan a la estructura – NCh170:2016

**C2-B: Severo**  
Atmosférico /  
Brisa Marina

**C2-C: Muy Severo**  
Intermareas /  
Salpicadura

**C2-A: Moderado**  
Sumergido

Exposición a cloruros de Agua de Mar



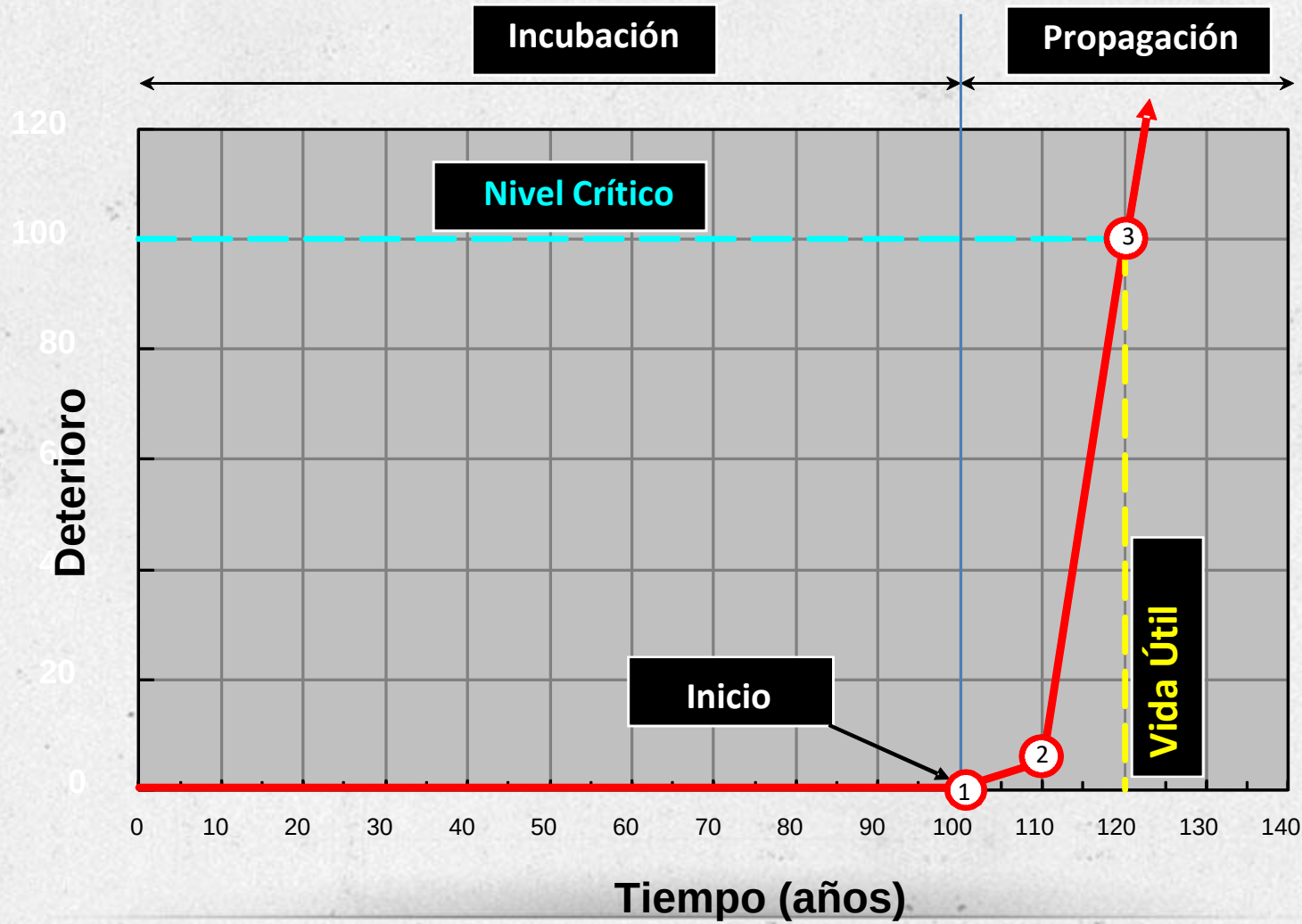


# Norma Chilena NCh170-2016: Hormigón-Requisitos Generales

| Grado       |             | Agente externo  | Exposición en condiciones de servicio                                                                                                                                           |
|-------------|-------------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>C0</b>   | No agresivo | No aplica       | Hormigón seco o protegido de la humedad ambiental                                                                                                                               |
| <b>C1</b>   | Leve        | CO <sub>2</sub> | Hormigón húmedo expuesto a altas concentraciones de CO <sub>2</sub>                                                                                                             |
| <b>C2-A</b> | Moderado    | Cloruro         | Hormigón sumergido completamente en agua que contiene cloruro                                                                                                                   |
| <b>C2-B</b> | Severo      | Cloruro         | Hormigón húmedo expuesto a aire salino                                                                                                                                          |
| <b>C2-C</b> | Muy severo  | Cloruro         | Hormigón expuesto a ciclos de humedad y a una fuente externa de cloruro proveniente de productos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen |

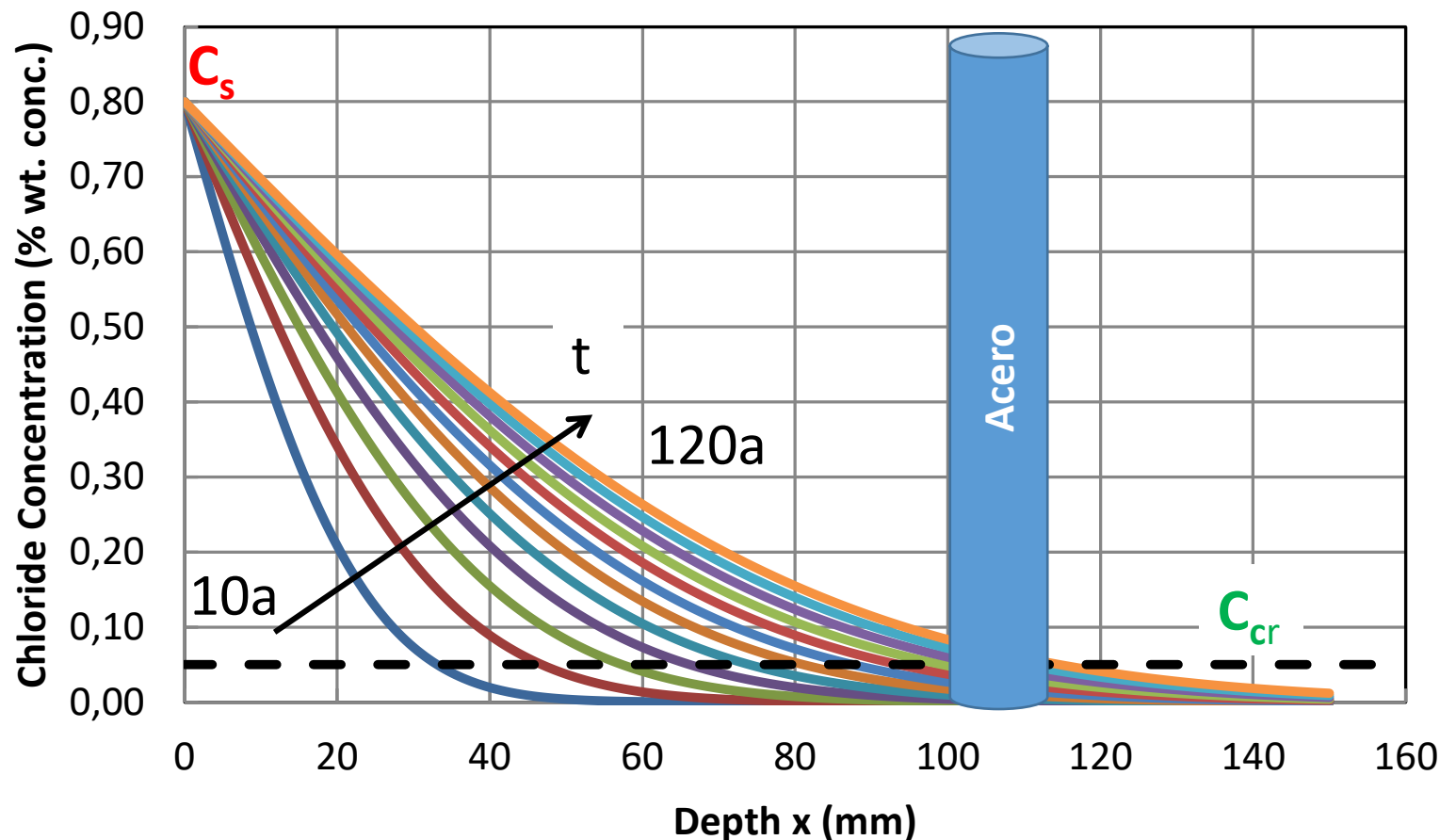


# Etapas del Proceso de Deterioro





# Estimación del Coeficiente de Difusión de Cloruros con 2da. Ley de Fick



$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D \frac{\partial C}{\partial x} \right)$$

$$C_{(x,t)} = C_s * \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 * \sqrt{D * t}} \right) \right\}$$

cuando  $C_{(x,t)} = C_{cr}$

$$T_i = \frac{x^2}{4 D} \left( \frac{1}{\operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{C_{cr} - C_0}{C_s - C_0} \right)} \right)^2$$

# Nivel de Diseño por Vida Útil a aplicar

| Nivel de Diseño | Método de Cálculo                                                   | Datos de Entrada                                                                                                                                                                                                                                   | Ejemplos de Normas y Códigos                                                                                                                                                                           |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>I</b>        | Presunción de Cumplimiento<br>“Deemed to Satisfy”<br>(Prescriptivo) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relación <math>a/c_{\max}</math> y <math>c_{\min}</math></li> <li>• Resistencia <math>f'c</math>, <math>c_{\min}</math>, <math>c_{em_{\min}}</math></li> </ul>                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Euronormas (Eurocode 2, EN 206/1)</li> <li>• ACI 318</li> <li>• NCh, Argentina</li> </ul>                                                                     |
| <b>II</b>       | Indicadores de Durabilidad<br>(Ensayos por Desempeño)               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Succión Capilar WA</li> <li>• Migración Cloruros M</li> <li>• Penetración Cloruros Q</li> <li>• Penetración Agua WP *</li> <li>• Permeabilidad al Aire kT</li> <li>• Resistividad Eléctrica SR</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Argentina (CIRSOC)</li> <li>• Canadá (CSA)</li> <li>• Chile (NCh170)</li> <li>• España (EHE-08)</li> <li>• Sudáfrica (SABS)</li> <li>• Suiza (SIA)</li> </ul> |
| <b>III</b>      | Modelos Analíticos                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Relación <math>a/c</math></li> <li>• <math>a/c</math> o Resistencia <math>f'c</math></li> <li>• Múltiples</li> </ul>                                                                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Life-365</li> <li>• EHE08</li> <li>• Stadium</li> </ul>                                                                                                       |
| <b>IV</b>       | Probabilístico (Semi)                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Difusión <math>Cl^-</math>, Migración de <math>Cl^-</math></li> </ul>                                                                                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Duracrete/fib</li> <li>• Duracon</li> </ul>                                                                                                                   |
| <b>V</b>        | Experimental “in situ”                                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Permeabilidad a <math>O_2</math> y <math>Cl^-</math></li> <li>• Permeabilidad al Aire <math>kT_o</math> y <math>c_o</math></li> </ul>                                                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sudáfrica</li> <li>• Exp-Ref</li> </ul>                                                                                                                       |



# Ensayos de Desempeño de Durabilidad

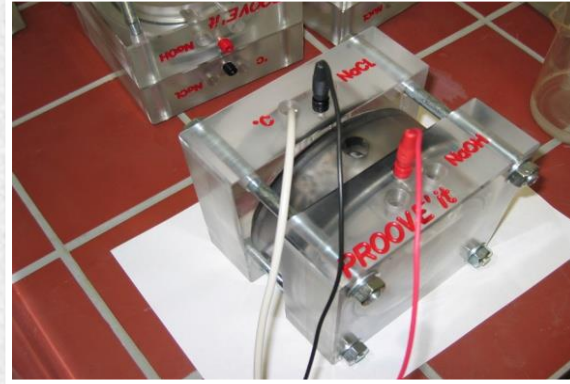
Resistencia Compresión **f<sub>c</sub>**



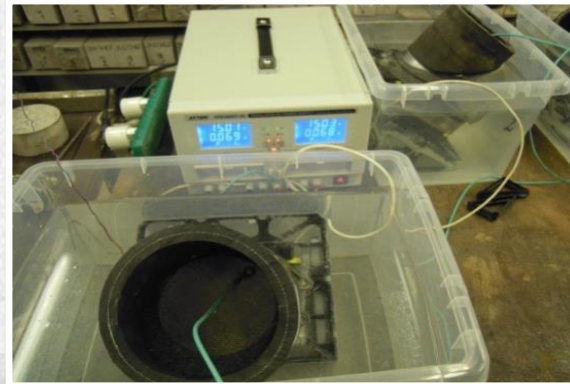
Resistividad Eléctrica **SR**



Penetración de Cloruros RCPT - **Q**



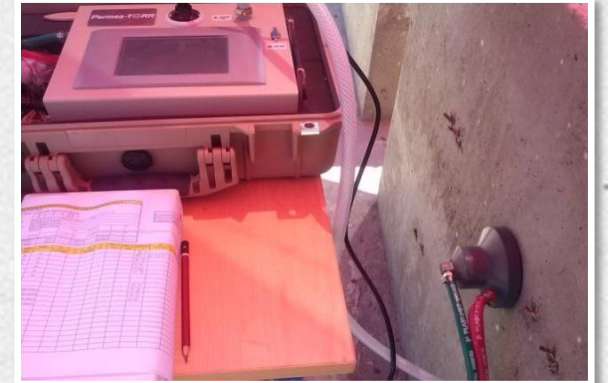
Migración de Cloruros RCM - **M**



Penetración de Agua a Presión - **WP**



Permeabilidad al Aire por Vacío - **kT**





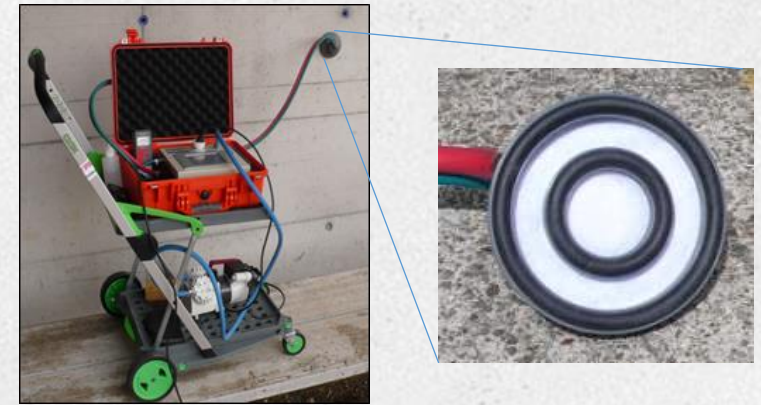
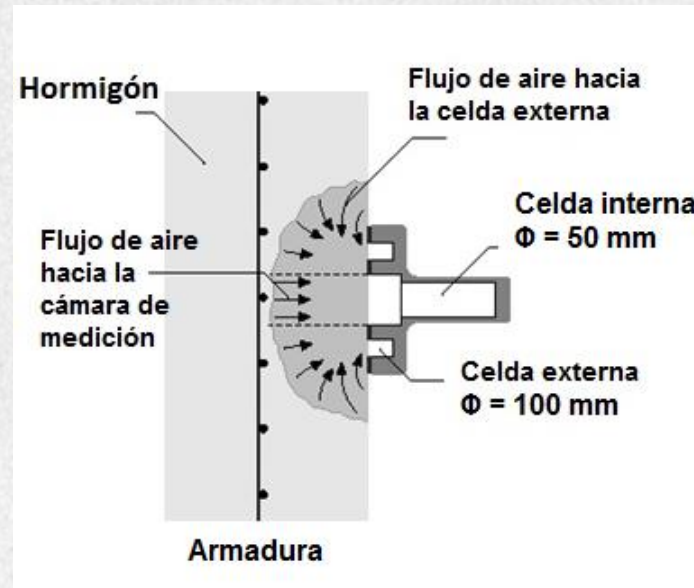
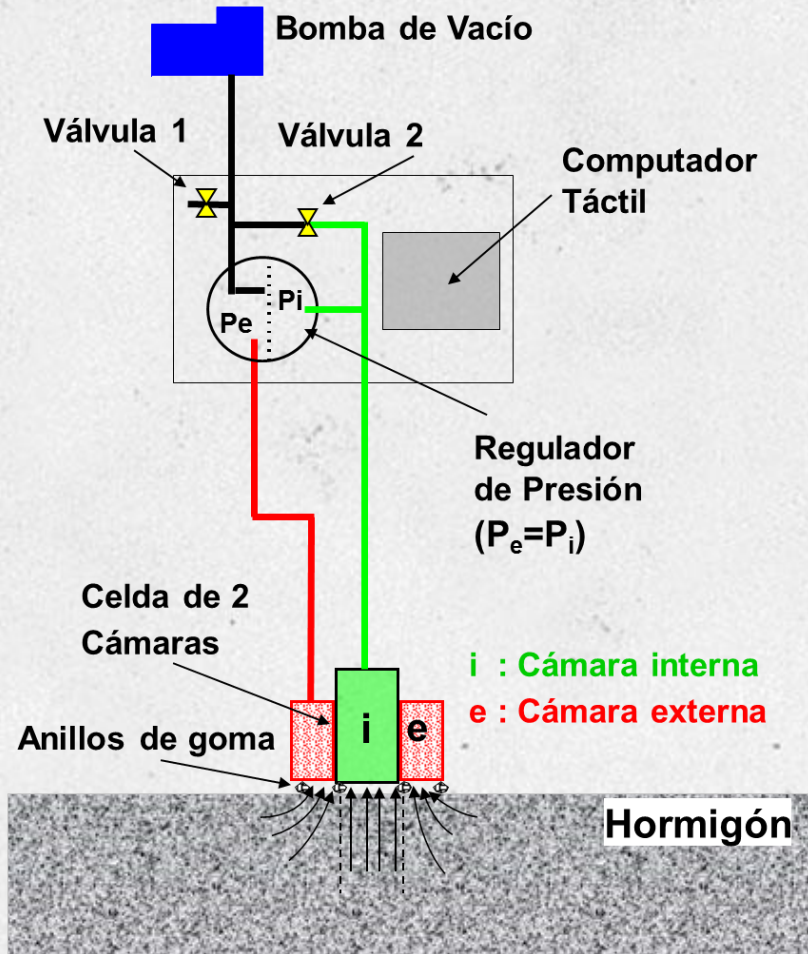
II.

# Descripción del Método de Permeabilidad al Aire según Norma Suiza 262/1-E





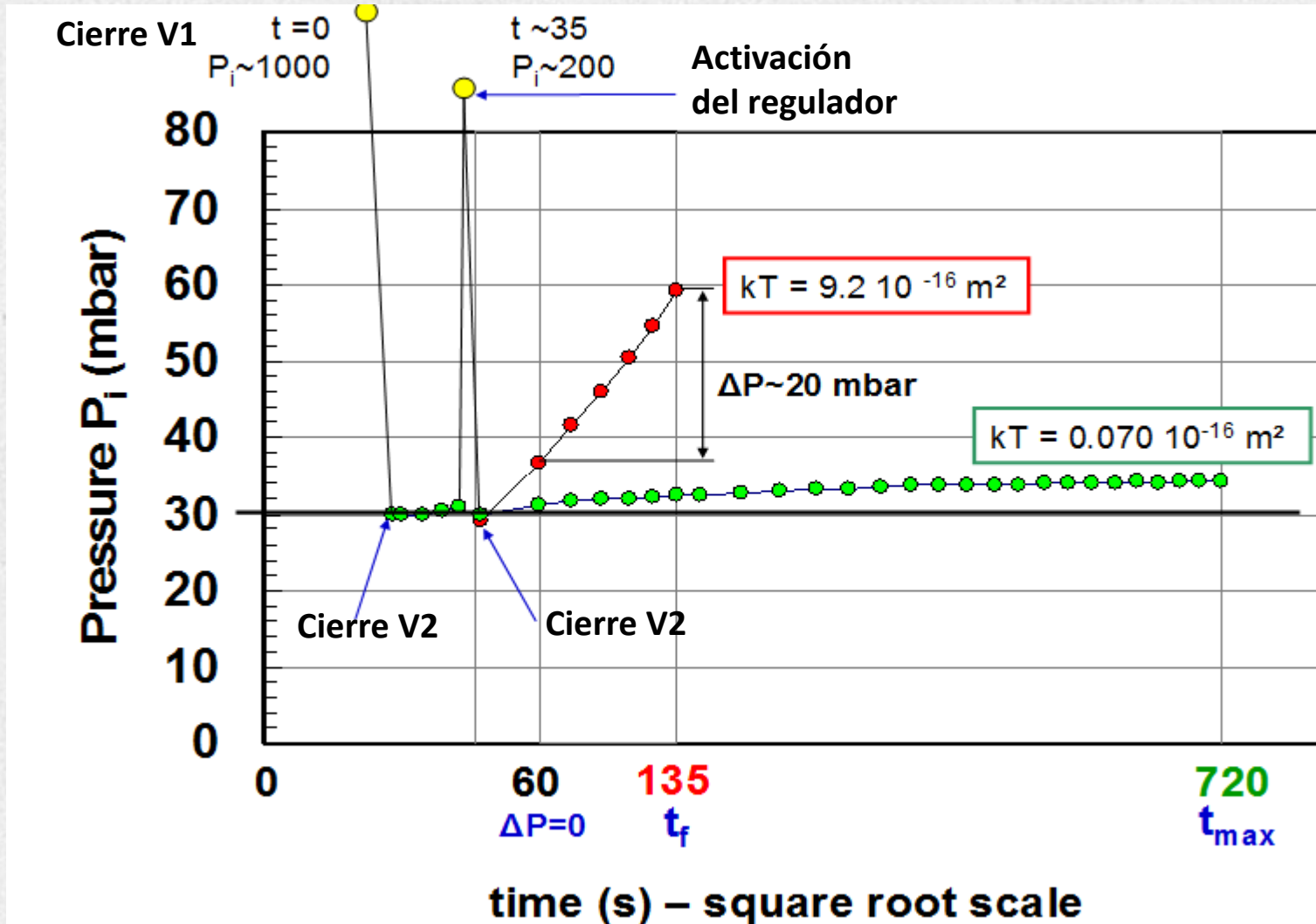
# Descripción del Método de Ensayo



- Equilibrio de presiones entre celda exterior e interior para la obtención de flujo perpendicular a la superficie, condición requerida para asegurar el desarrollo teórico.



# Evolución de la presión interna



- El equipo cuenta con sistema propio de auto-calibración.
- El ensayo dura 6 / 12 minutos.
- Es totalmente no-destructivo.
- Aplicable en laboratorio e in-situ



# Clasificación de la Permeabilidad

| Clase | kT ( $10^{-16} \text{ m}^2$ ) | Permeabilidad |
|-------|-------------------------------|---------------|
| PK0   | < 0.001                       | Despreciable  |
| PK1   | 0.001 - 0.01                  | Muy Baja      |
| PK2   | 0.01 - 0.10                   | Baja          |
| PK3   | 0.10 - 1.0                    | Moderada      |
| PK4   | 1.0 - 10                      | Alta          |
| PK5   | 10 - 100                      | Muy Alta      |

- La permeabilidad al aire (kT) del hormigón de recubrimiento se mide directamente en la estructura terminada a la edad de **28 días**, pudiendo ampliarse a 90 días.
- El recubrimiento se considera superficialmente seco cuando el contenido de humedad, medido por impedancia eléctrica, es menor a **5,5%**.





# Ejecución del Ensayo

- ❑ Verificación armaduras.



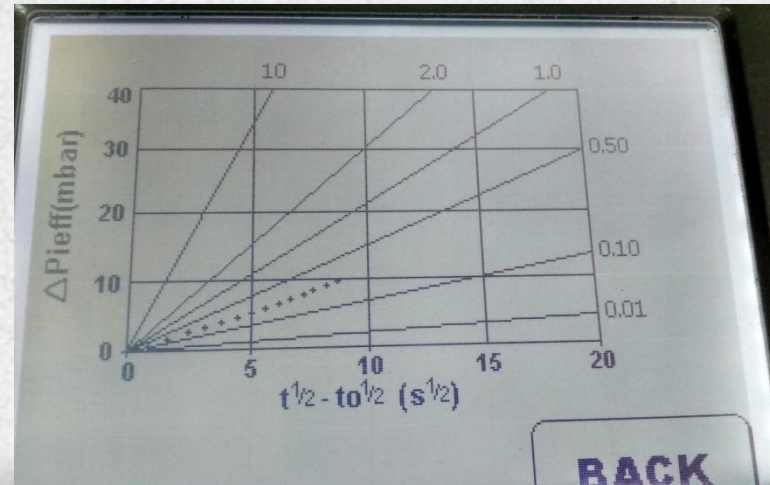
- ❑ Campana adosada a losa superior durante la medición.



- ❑ Control humedad superficial.



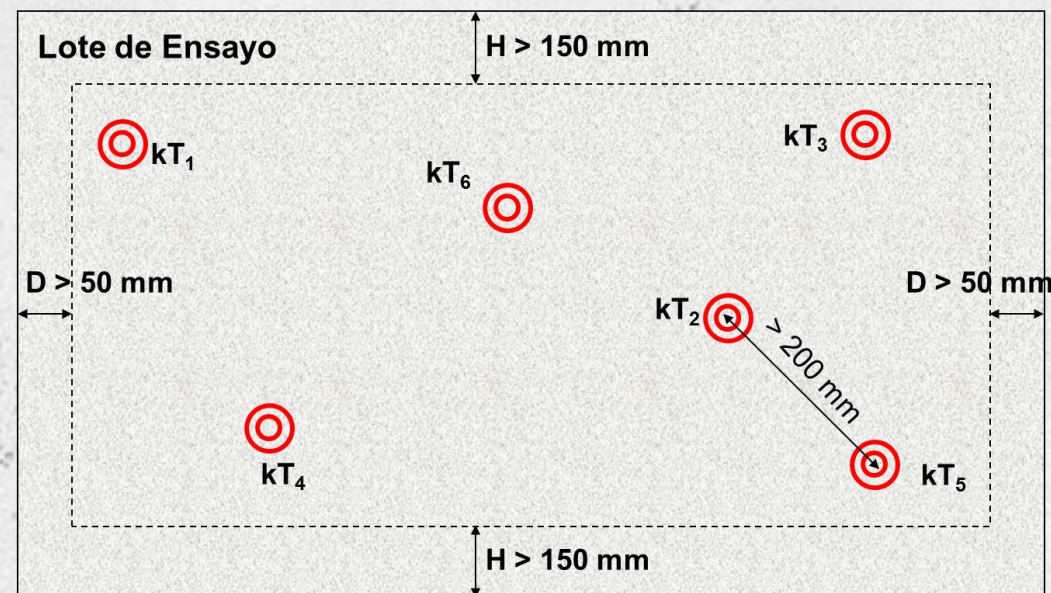
- ❑ Pantalla del equipo durante proceso de medición.





# Recomendaciones para el Control de Calidad de mediciones de Permeabilidad al Aire

- ❑ Condición 1:  
No más de 1 ensayo de 6 en total con  $kT > kT_s$
- ❑ Condición 2:  
Si 2 ensayos  $> kT_s$  se seleccionan 6 nuevas posiciones aleatoriamente desde el mismo lote  
  
No más de 1 ensayo de los 6 nuevos con  $kT > kT_s$
- ❑ Si ninguna de estas condiciones se cumple, el lote se considera que no cumple con la permeabilidad  $kT_s$  especificada.
- ❑ Valores especificados por la Norma in-situ:  
Condiciones severas  $2.0 \cdot 10^{-16} \text{m}^2$   
Condiciones muy severas  $0.5 \cdot 10^{-16} \text{m}^2$



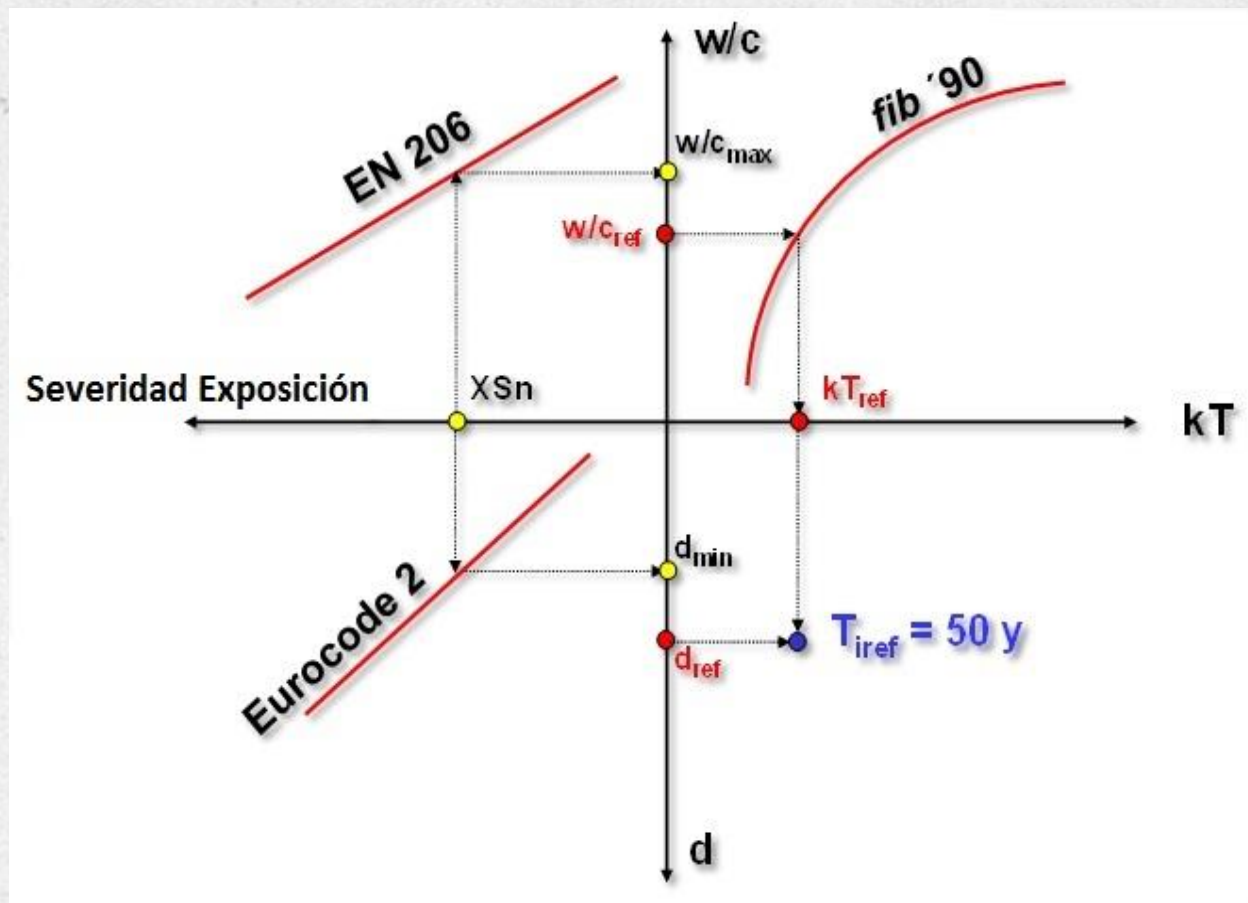
III.

Metodología Exp-Ref basada en mediciones de la Permeabilidad al Aire



# Referencia a Normas y Códigos establecidos

- **EN206:**  
Clases de Exposición.
- **Eurocode 2:**  
 $d_{min,dur}$   
recubrimiento mínimo para garantizar la protección de la armadura contra la corrosión, por 50 años en clasificación S4.

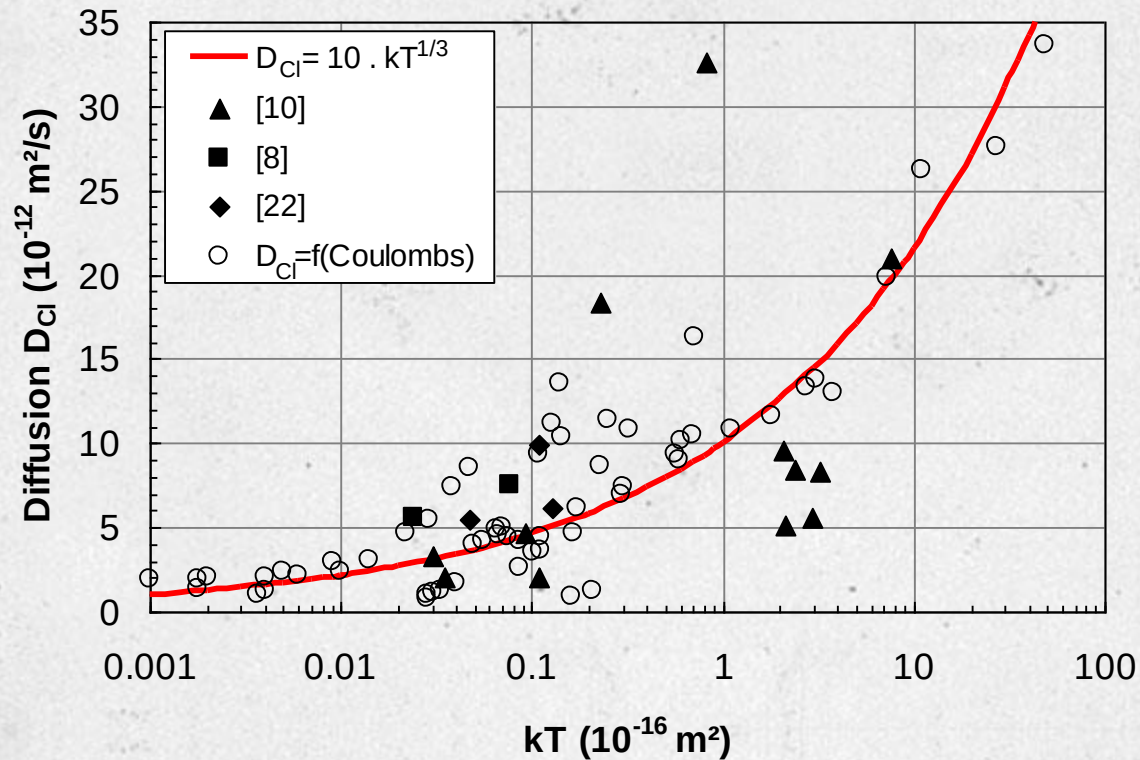


- **fib 90:**  
relación de laboratorio entre permeabilidad al oxígeno y  $a/c$ .
- **Referencial:**  
se fijan valores de  $a/c_{ref}$  y  $d_{ref}$  nominales considerando rangos de seguridad típicos, lo que permite calcular el factor  $\alpha$  y  $\beta$  que relaciona  $kT$  y  $c$  con  $Ti$ .

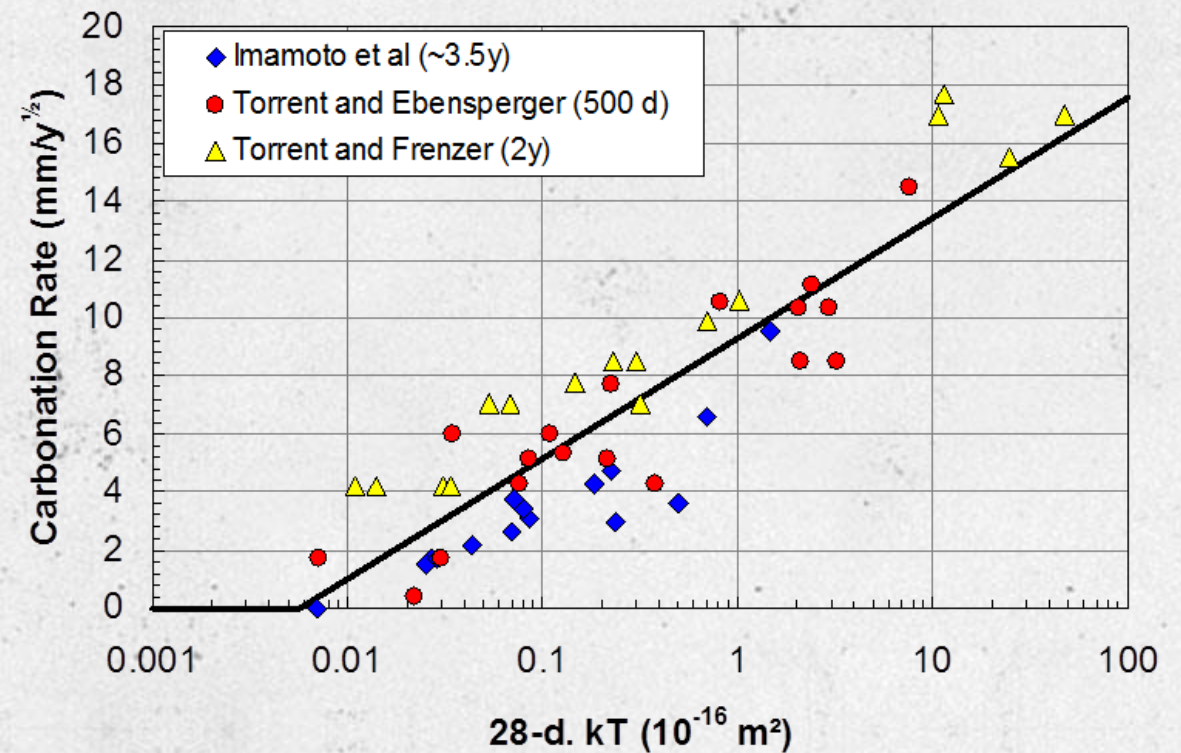


# Correlación Experimental con Ensayos

Difusión de Cloruros  $D_{Cl}$



Carbonatación (penetración)





# Incorporación de kT en el Diseño

## ➤ Ambiente con Cloruros

$$VU = \alpha * \frac{c^2}{kT^{1/3}} + Tp_{Cl}$$

$$Tp_{Cl} = 6$$

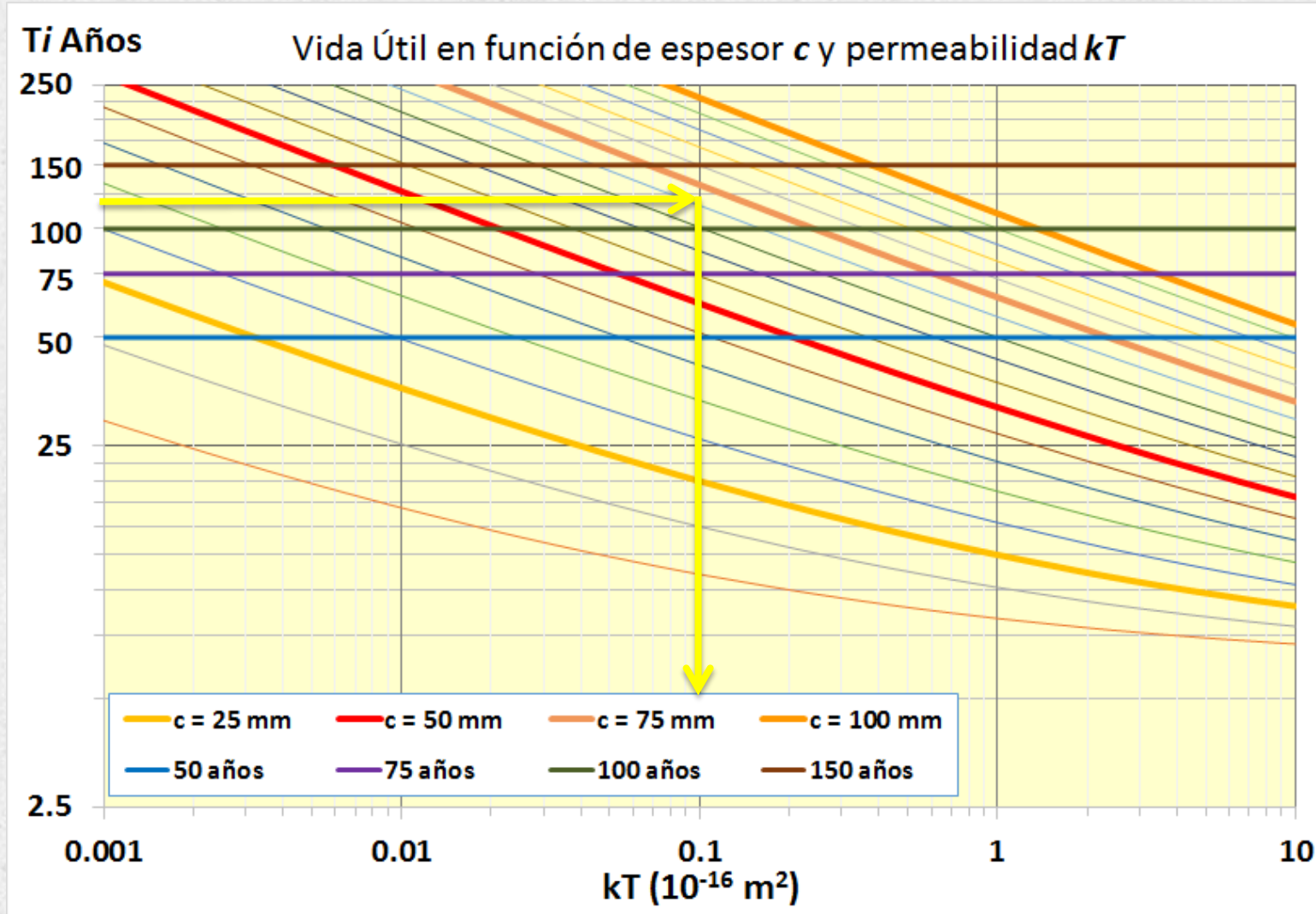
## ➤ Ambiente con Carbonatación:

$$VU = \beta * \frac{c^2}{[\ln(174 * kT)]^2} + Tp_{CaO}$$

- **VU** = Vida Útil en años
- **α y β** = coeficientes que dependen de las condiciones de exposición a cloruros y carbonatación.
- **Tp** = Período de Propagación en años = f(Clase de Exposición; corrosión estimada de 100 μm).



# Aplicación del Método



Para Exposición Clase XS2 (C2-B)

□ Ejemplo de Diseño:

$Ti = 120$  años

$c = 75 \text{ mm} \rightarrow$

□  $kTs = 0.10 \cdot 10^{-16} \text{ m}^2$



# Nuevo Megaproyecto en China



- Verificación de Vida Útil de elementos prefabricados sumergidos



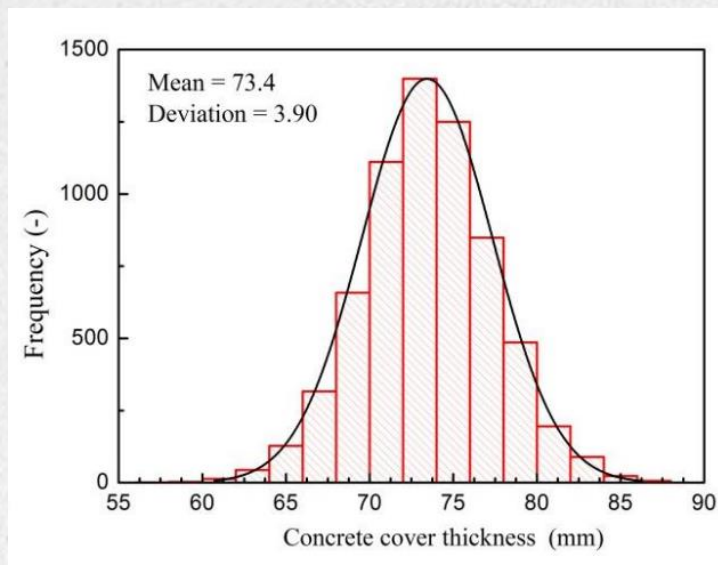
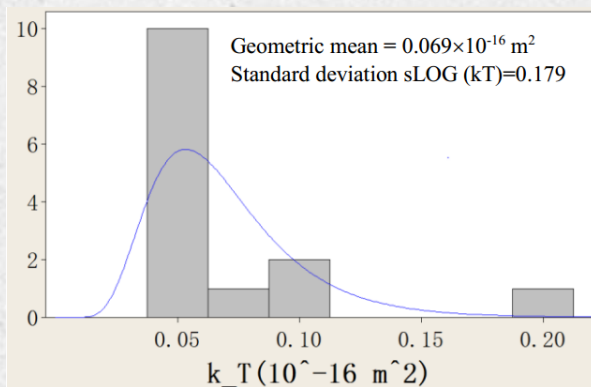
# Nuevo Megaproyecto en China

Mediciones in-situ y Análisis Probabilístico

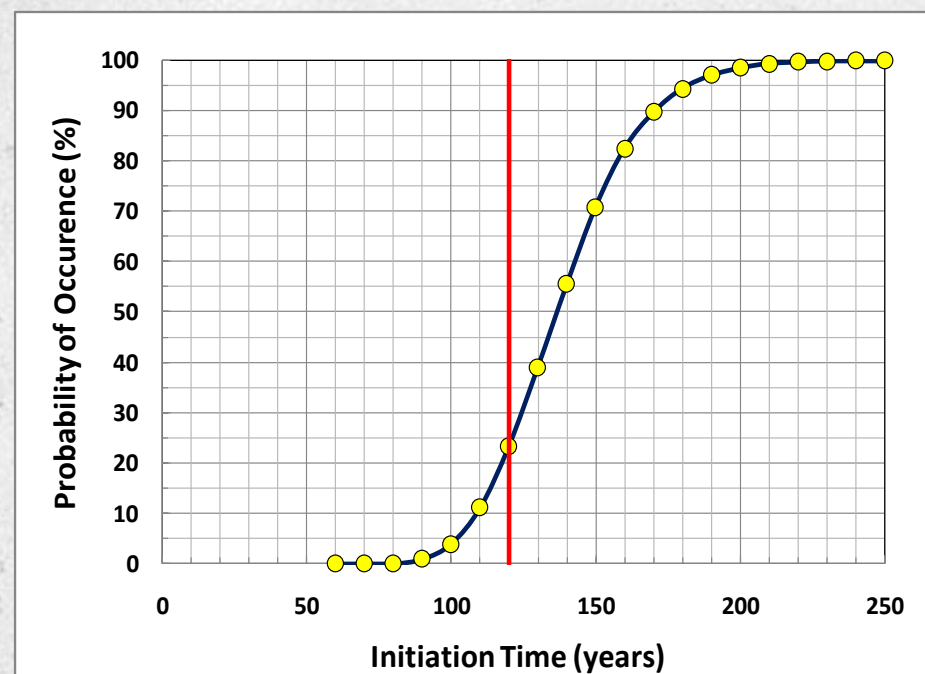
Estimación de la vida útil a partir de mediciones

$$kT_g = 0,069 \times 10^{-16} \text{ m}^2$$

$$c = 73,4 \text{ mm}$$



Probabilidad de Ocurrencia de Corrosión



$$P(t=120a) = 24\%$$





IV.

Aplicación práctica del Método

# Alcances del Método

En aquellas obras sometidas a condiciones ambientales exigentes, cuyas condiciones deben ser identificadas previamente, se recomienda realizar un Diseño por Vida Útil simplificado mediante el método **Exp-Ref**.

Para ello es necesario incorporar en las distintas **etapas** de la construcción ensayos que permitan finalmente estimar la Vida Útil esperada de la estructura.

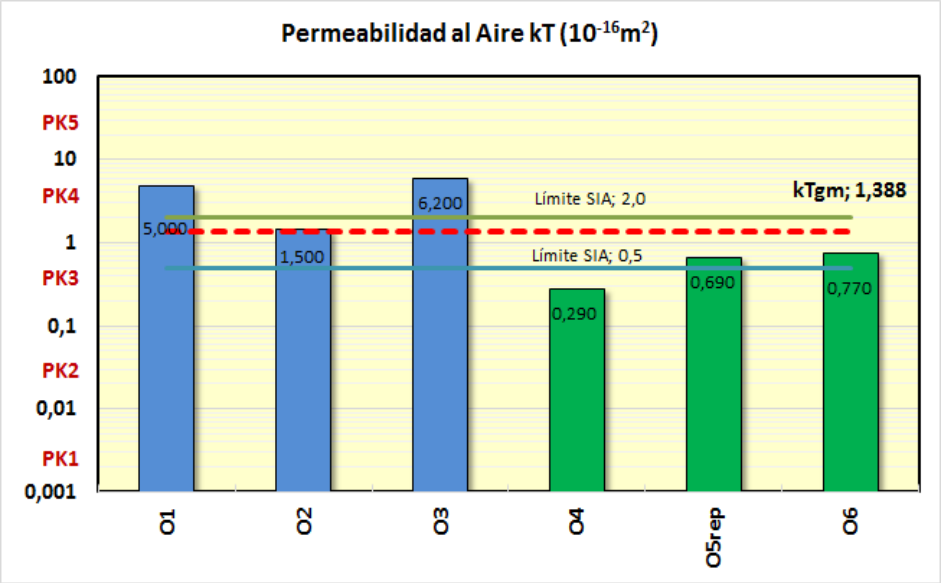




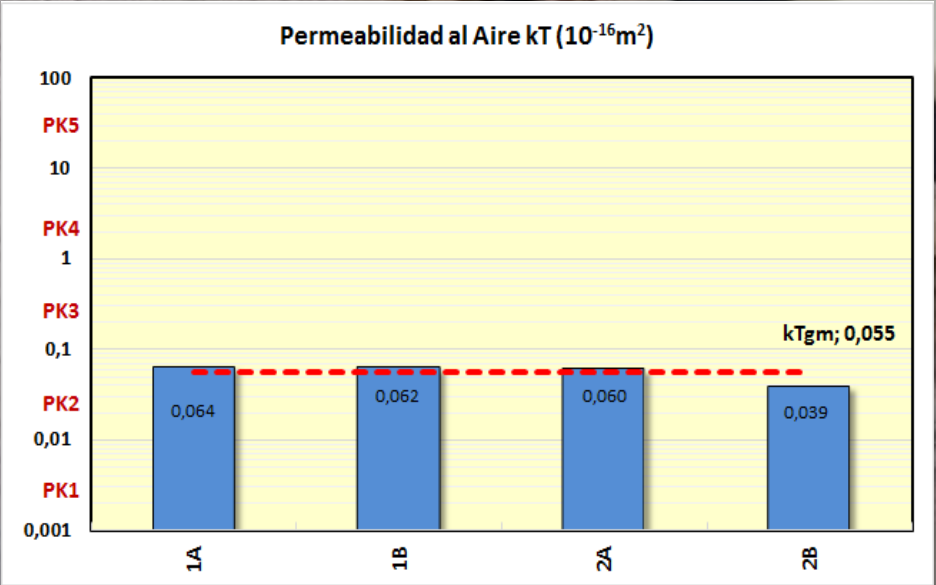
# Mediciones de $kT$ en el Hormigón

| Especificación - $kT_s$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Diseño de Mezcla – $kT_L$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Construcción – $kT_c$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Obra terminada - $kT_o$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>En la Etapa de Diseño se genera la <b>Especificación Técnica</b> que debe determinar la combinación entre la Permeabilidad al Aire <math>kT_s</math> y el recubrimiento del hormigón <math>c_s</math>, que permitan asegurar la Vida Útil esperada.</p> <p>Ambos valores son especificados y dependen del análisis de las condiciones ambientales donde se ubicará la obra/proyecto.</p> | <p>El valor de Permeabilidad al Aire a obtener en la Etapa de Diseño de Mezclas debe contener el efecto generado durante el proceso de construcción, en especial la <b>colocación, compactación y curado</b>, que por lo general producirán un aumento de la permeabilidad del hormigón. El valor <math>kT_L</math> a obtener en laboratorio debe ser más exigente que el valor especificado o <math>kT_s</math>. Por experiencias prácticas, se estima que el factor de corrección <math>\delta_c</math> se ubica en el rango de 10 a 36 veces.</p> | <p>Durante la Etapa de Construcción, se requiere verificar que la calidad del hormigón recepcionado en obra cumple con los requisitos de durabilidad especificados.</p> <p>Se requiere incorporar un <b>muestreo adicional</b> al habitual para resistencia. Las probetas se someten a un curado normalizado, y a la edad de 28 días se mide el valor <math>kT_c</math> (control), el cual debiera aproximarse al valor <math>kT_L</math> determinado en la fase anterior.</p> | <p>En la obra terminada, a la edad de 28 a 90 días se debe medir:</p> <p>Permeabilidad al Aire <math>kT_o</math></p> <p>Espesor de Recubrimiento <math>c_o</math></p> <p>La combinación de ambos valores junto a la desviación determinada, entregará como resultado la Vida Útil esperada de la obra, la cual debe cumplir con la especificada.</p> |

# Determinación factor $\delta c$



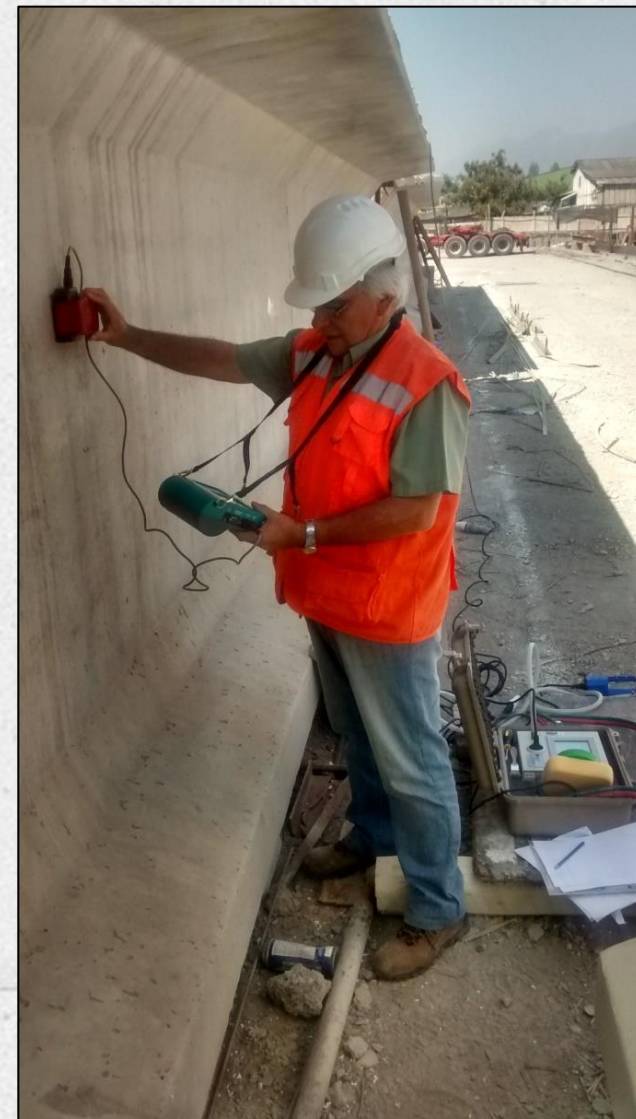
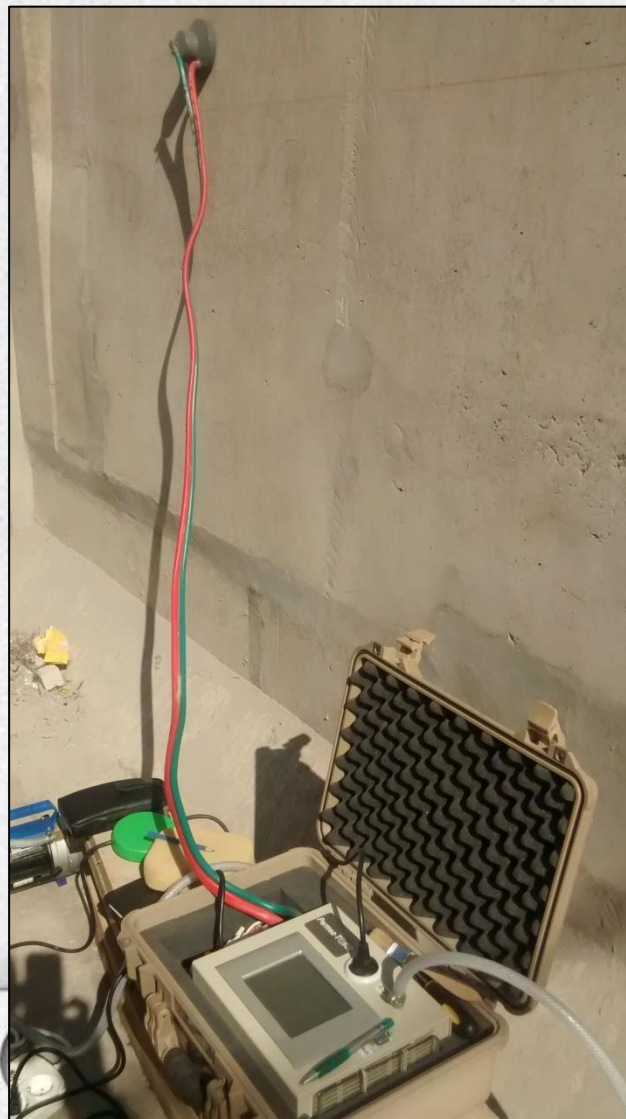
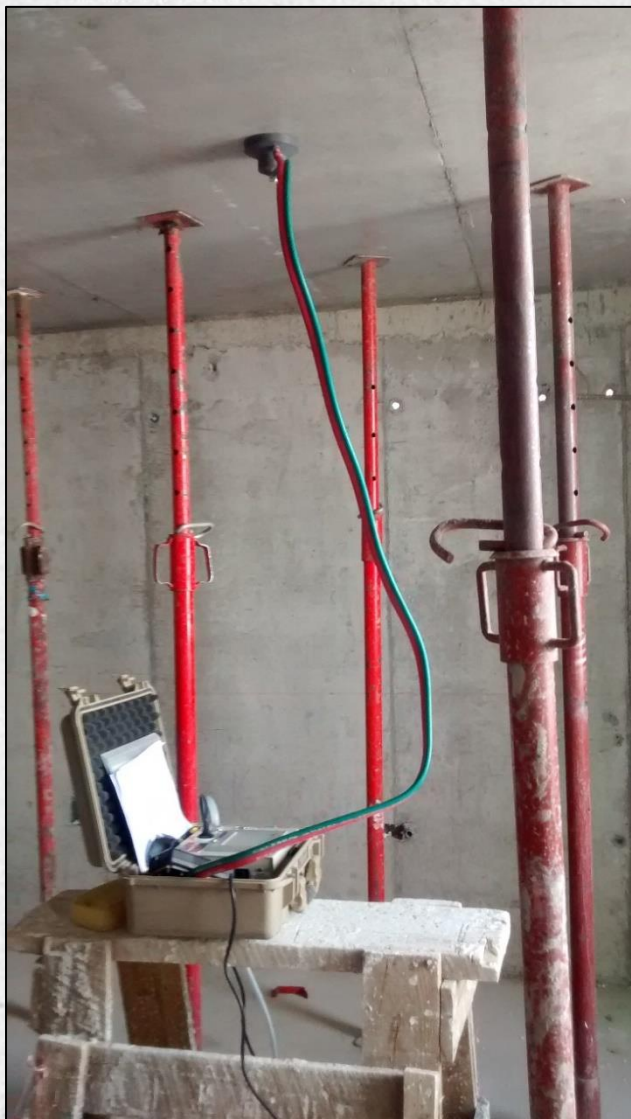
x25



Edificio Habitacional en Santiago,  
Losa Hormigón Convencional



# Ejemplos de Aplicación



RMIGON.CL



# Resumen Metodología

## Especificación

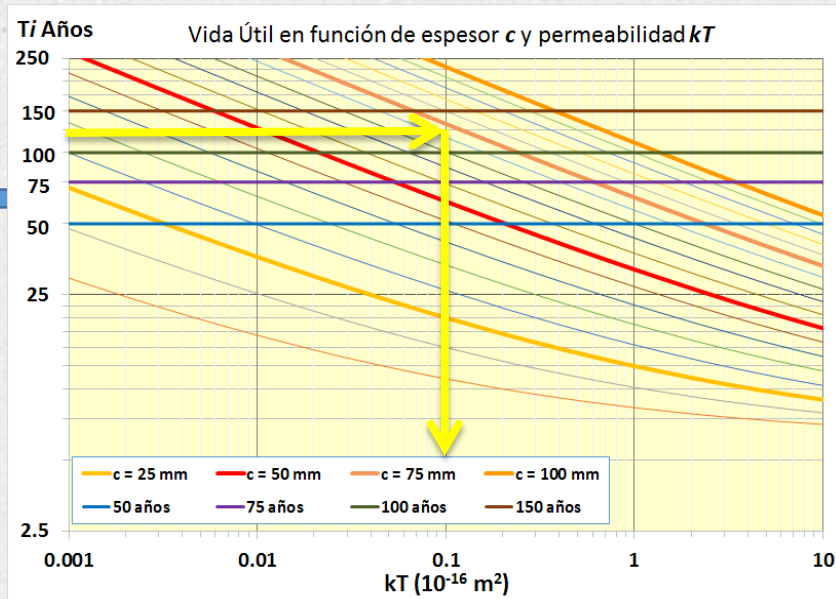
- Proyecto de  $T_i=120$  años / C2-B:  
 $c_s=75\text{mm}$  /  $kT_s=0.10 \cdot 10^{-16}\text{m}^2$

## Diseño de Mezcla

- Condiciones de obra:  
factor constructivo normal  $\delta c=10$ .
- Condiciones de laboratorio:  
 $kT_L = kT_s / \delta c$   
 $kT_L = 0.010 \cdot 10^{-16}\text{m}^2$  {STD}

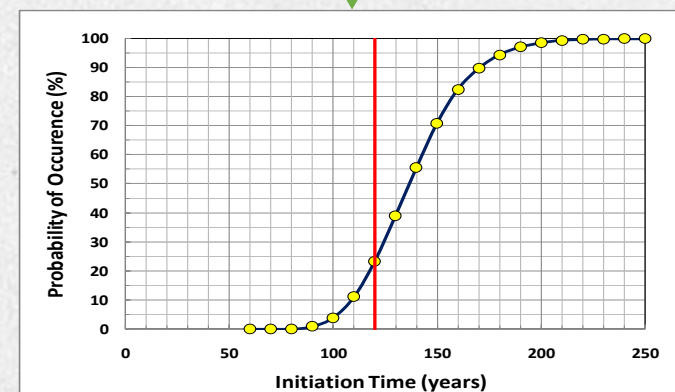
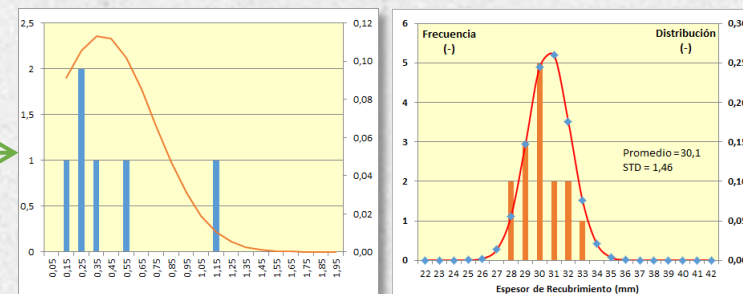
## Construcción

- Control hormigón entregado:  
 $kT_c \approx 0.010 \cdot 10^{-16}\text{m}^2$  {STD}



## Control en obra terminada

- $kT_o$ ; {STD} -  $c_o$ ; {STD}
- $P\{T_i=120 \text{ años}\} < 20\%$





V.

Conclusiones

Veinte años de experiencia práctica con el método de Permeabilidad al Aire  $kT$  permiten un análisis en forma simple de la **estimación de Vida Útil** de estructuras de hormigón, con énfasis en aquellas sujetas a condiciones agresivas provenientes del efecto de la carbonatación del hormigón y/o el ingreso de cloruros, con la posterior corrosión que afecta al acero de refuerzo. El método está considerado como método complementario en el **Anexo B.3.1** de la NCh170:2016.

La mayor ventaja del método presentado radica en la posibilidad de ser utilizado en las distintas etapas de un proyecto;

- desde la especificación  $kT_s$
- pasando por el diseño de mezclas en laboratorio  $kT_L$
- el control de producción del hormigón durante el período de construcción  $kT_c$
- hasta la verificación del cumplimiento de los requerimientos en la obra terminada  $kT_o$ .

Para una obra de envergadura, la metodología puede ser calibrada a las condiciones de los materiales componentes y el desempeño obtenido en mezclas de laboratorio, lo cual le otorga a la Metodología Integral de Diseño por Vida Útil una adecuada versatilidad para ser aplicada a distintos requerimientos de diseño.

