



**RC 2018** xvii Reunión  
del **CONCRETO**

El evento del Cemento, el Concreto y los Prefabricados

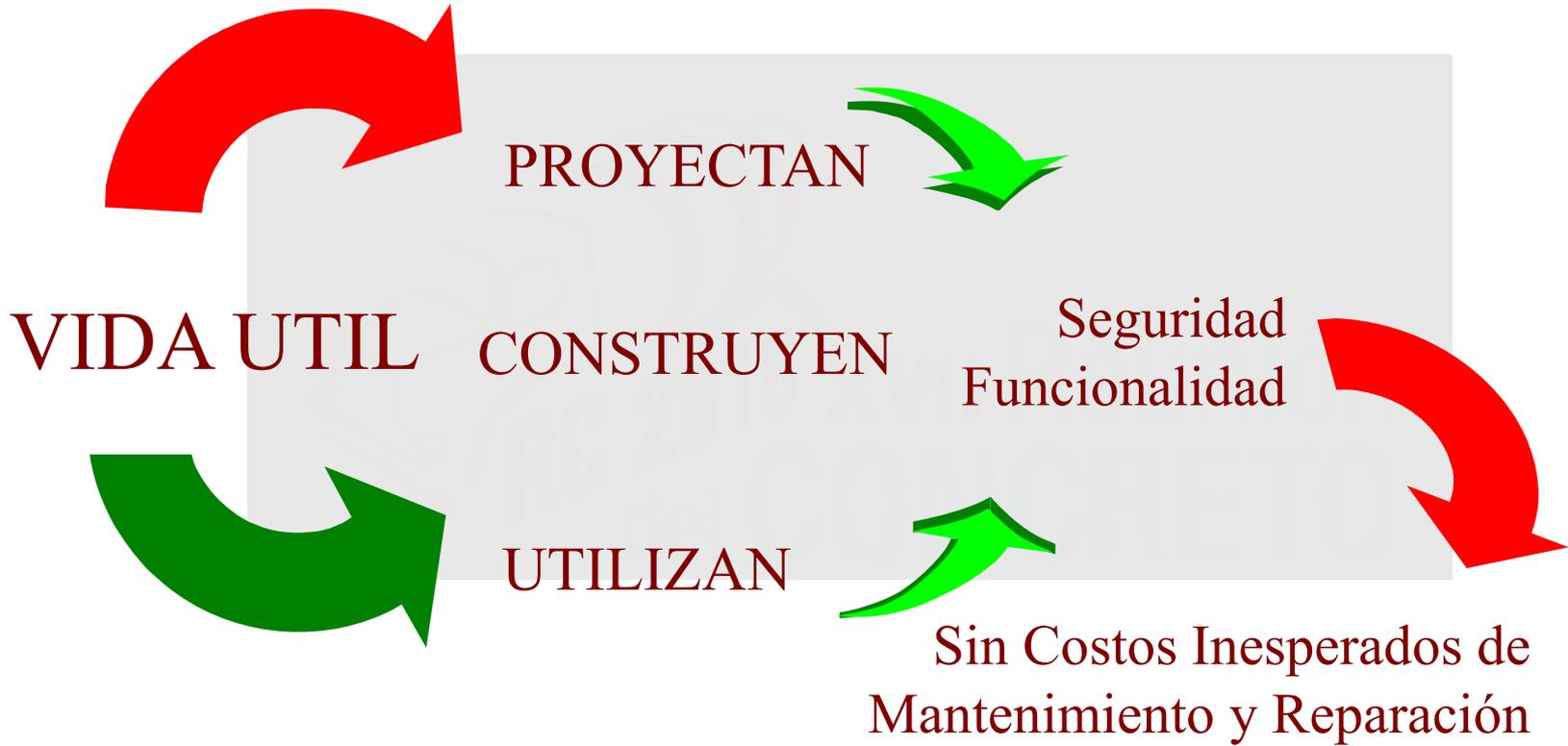


# ***DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO POR DURABILIDAD***

***Andrés Antonio Torres Acosta***

***Instituto Mexicano del Transporte / Universidad Marista de Querétaro  
México***

# Definición de estructura durable



- *Definir vida útil del proyecto*
- *Seleccionar materiales que deben utilizarse en función del ambiente de exposición*
- *Diseñar por cargas (método tradicional)*
- *Definir especificaciones en planos adecuadamente para construcción*

CLASE GENERAL DE EXPOSICIÓN				
Clase (Ambiente de exposición)	Subclase (Condición de exposición)	Tipo de proceso	Designación (Clasificación)	Descripción
No agresivo	Seco	Ninguno	C0	Concreto en ambiente seco o protegido de la humedad y no sometido a condensaciones. Con una humedad relativa < 40 %.
Rural / Urbana	Concreto en contacto con humedad baja	Corrosión por carbonatación	C1	Concreto en ambiente con baja humedad relativa entre 40 % y 50 %, independiente de la contaminación por CO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> .
	Concreto en contacto con humedad moderada		C2	Concreto en ambiente con moderada humedad relativa entre 50 % y 80 %, con contaminación por CO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> .
	Concreto en contacto con humedad alta		C3	Concreto en ambiente con alta humedad relativa > 80 %, independiente de la contaminación por CO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> .
Marina	Sumergida	Corrosión por cloruros	M1	Elementos de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajar. mar.
	Zonas aéreas con distancias de 50 m a 500 m a la línea de costa		M2	Elementos exteriores de estructuras en las proximidades de la línea de costa (de 50 m a 500 m).
	Zonas aéreas con distancias de 0 m a 50 m		M3	Elementos de estructuras marinas por encima del nivel de pleamar (salpique) de 0 m a 50 m de la línea de costa.
	En zonas de mareas		M4	Elementos de estructuras marinas situadas en la zona de mareas y salpique.
Concreto con cloruros de origen diferente al medio marino	Concreto reforzado o presforzado expuesto a la incorporación de ión cloruro desde su fabricación		CI1	Concreto producido con materiales que contengan contaminación de ion cloruro soluble en el agua < 0,06 %, respecto al consumo de material cementante.
	Concreto reforzado o presforzado expuesto a una fuente externa de cloruros		CI2	Concreto expuesto a humedad y una fuente externa de cloruros.

Donde: C: Ataque por carbonatación; M: Ataque por ambiente marino; Q: Ataque químico; F: Congelamiento y deshielo  
D: Daño mecánico

EQUISITOS <sup>a</sup>	Sin riesgo de corrosión	Corrosión inducida por carbonatación				Corrosión inducida por cloruros						Industria / Agresividad química				Congelamiento y deshielo		Desgaste <sup>d</sup>
						Proveniente de agua de mar				Origen distinto del agua de mar						Limitada exposición al agua	Exposición frecuente al agua y sustancias descongelantes	
						C1	C2	C3	M1	M2	M3							
Máxima relación a/c	Simple Reforzado Presforzado	- 0,60 0,60	- 0,60 0,55	- 0,55 0,50	- 0,50 0,45	0,40 0,40 0,40	0,45 0,45 0,42	0,42 0,38 0,35	0,40 0,35 0,35	- 0,50 0,40	- 0,40 0,35	0,50 0,50 0,50	0,45 0,45 0,40	0,45 0,40 0,40	- 0,55 0,50	- 0,45 0,40	0,50 0,45 0,45	
Mínimo Cont. Cem.	Simple Reforzado Presforzado	230 250 250	250 250 280	250 280 300	250 300 350	250 300 380	250 380 400	250 400 450	250 450 480	250 300 380	250 450 480	250 250 300	300 300 350	350 380 400	250 300 325	250 450 480	275 300 350	
Mínima resistividad a 90 días	Simple Reforzado Presforzado	10 10 20	10 15 20	20 25 30	15 20 25	20 30 40	20 40 50	20 60 60	20 60 70	20 30 40	20 60 70	20 20 20	20 30 40	30 40 50	20 20 30	40 50 60	30 40 50	
Máximo cont. Aire (%)	40 mm 20 mm 10 mm														4,5 5 6	5,5 6 7,5		
Requisitos adicionales para agregado						Desgaste máximo por prueba de los ángeles ≤ 40 %; Densidad ≥ 2,4; Bajo contenido de materia orgánica						Resistentes a congelamiento	Resistentes a congelamiento	Desgaste máximo por prueba de los ángeles ≤ 40 %; Densidad ≥ 2,4				
Otros requerim.	Todo tipo de cemento	Cementos con contenido total de álcalis inferior a 0,6 %				Cementos con 5 < C <sub>3</sub> A < 8 %				Cementos con C <sub>3</sub> A < 5 %				Cementos con 5 < C <sub>3</sub> A < 8 %		Todo tipo de cemento		

valores en esta Tabla fueron considerados para cemento tipo CPO con contenidos de Clinker por arriba de 85 % y un Blaine por arriba de 3.800 cm<sup>2</sup>/g.

En caso de utilizar otro tipo de cemento (CPC o CPP) con contenidos de Clinker menores del 85 % y/o Blaine por debajo de 3.800 cm<sup>2</sup>/g, se tendrán que modificar los valores de esta Tabla (normalmente disminuir la relación agua/cemento y/o aumentar los valores de contenido de cemento), en función de pruebas de laboratorio en el lugar, de acuerdo con lo establecido en las Normas Mexicanas NMX-C-504-ONNCE para lograr el mismo desempeño por resistividad eléctrica húmeda que define la tabla.

Se debe tener cuidado de que los agregados no tengan contaminación de materia orgánica, especialmente lo que necesitarán del uso de aditivos plastificantes o reductores de agua, ya que estos no funcionan bien con la presencia de materia orgánica.

Los valores en esta tabla deberán de corroborarse, una vez establecido el diseño de la mezcla con los materiales componentes empleados, que cumpla con los requisitos de durabilidad.

Los valores de resistividad húmeda a temperatura de 296 K ± 2 K (23 °C ± 2 °C) por el método directo conforme a lo indicado en la Norma Mexicana NMX-C-514-ONNCE-2016.

Esto permite una tolerancia de ± 1,5 %.

La abrasión en pisos deberá considerarse un contenido de cemento mínimo de 215 kg/m<sup>3</sup> y 245 kg/m<sup>3</sup> para tamaño máximo de agregado de 40 mm y 20 mm, respectivamente.

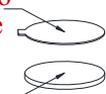
# Resistividad eléctrica

Es una propiedad eléctrica de los materiales que mide la capacidad del material para oponerse al flujo de una corriente eléctrica, y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m.

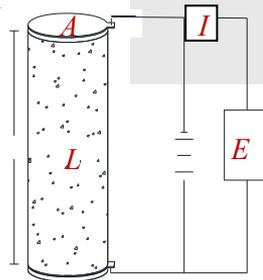
Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto y en menor grado de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa.

$$k = \left[ \frac{A}{L} \right] \quad \rho = R_e k$$

Placa de acero inoxidable



España

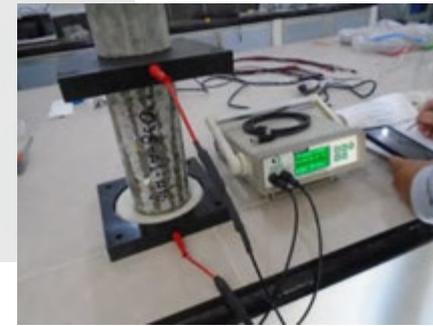


$A$  : Área de la sección transversal del espécimen.

$L$  : Longitud del espécimen.

$I$  : Representación del miliamperímetro.

$E$  : Representación del voltímetro.



# *Criterios de evaluación*

Resistividad	Porosidad interconectada en el concreto
$> 100 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm} - 200 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja.
$50 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ a $100 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	El concreto tiene una porosidad interconectada baja.
$10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$ a $50 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración.
$< 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$	El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva.



# Puentes en Península de Florida

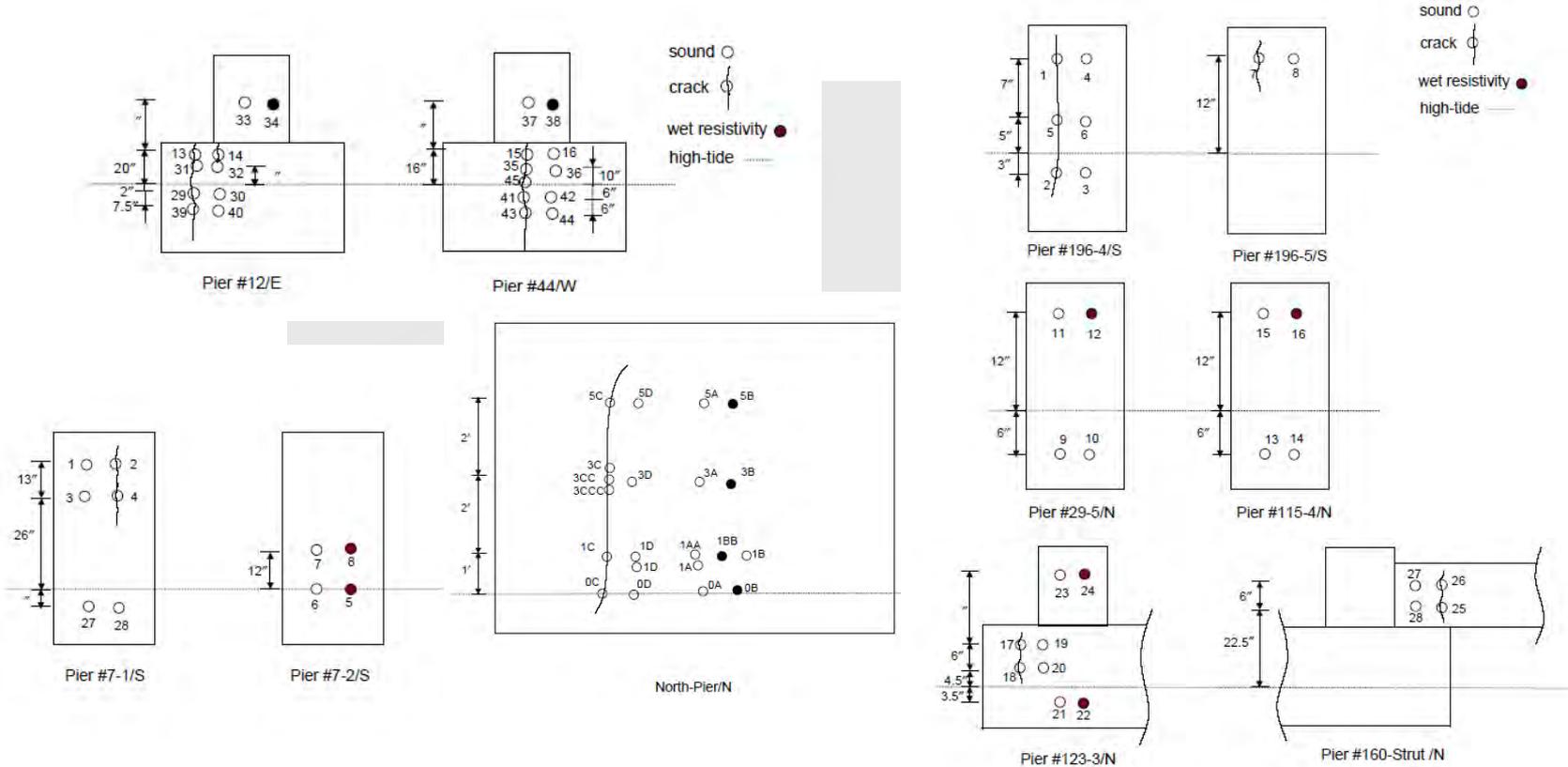
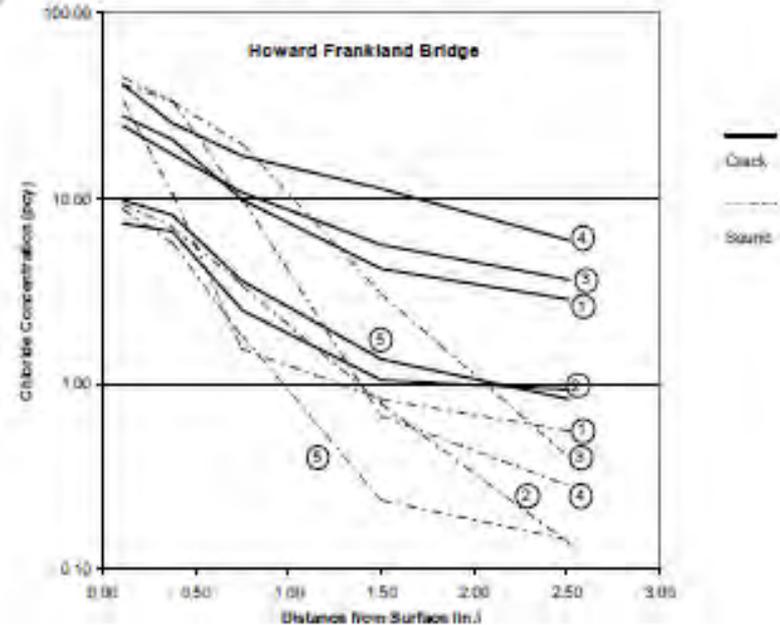
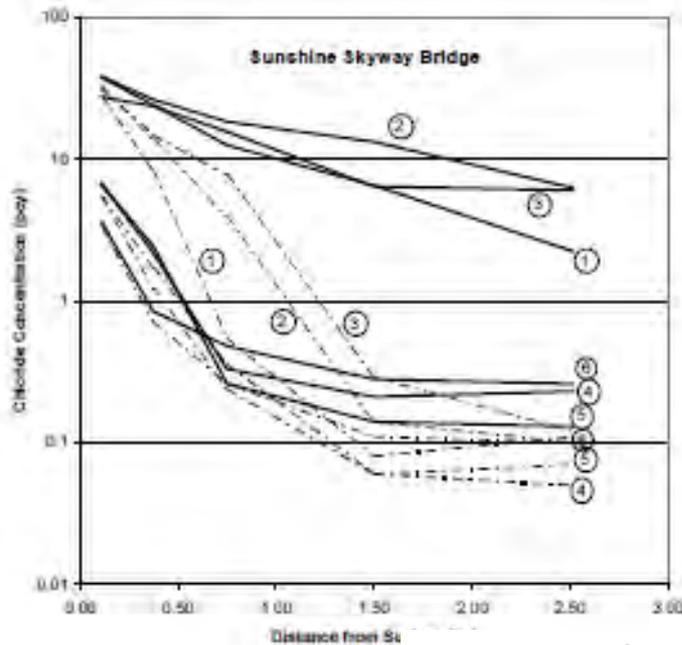
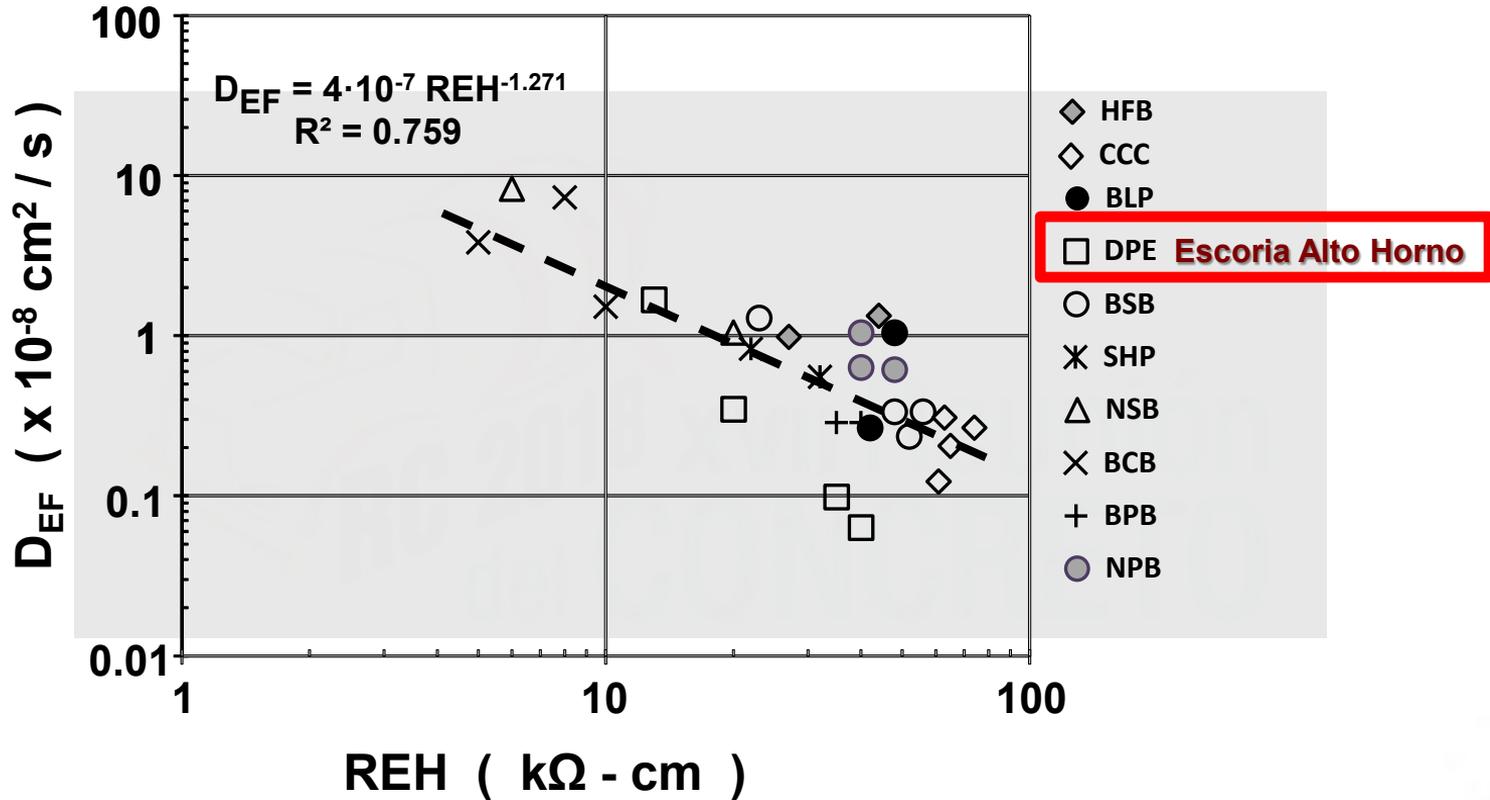


Figure A2-7 Core Extraction Locations at the BSB Bridge

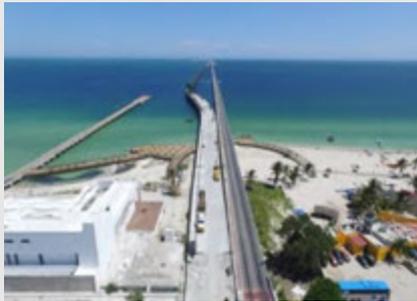
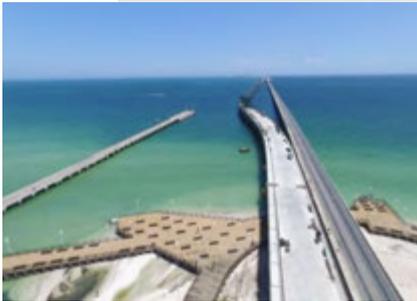
## Perfil de concentración de cloruros



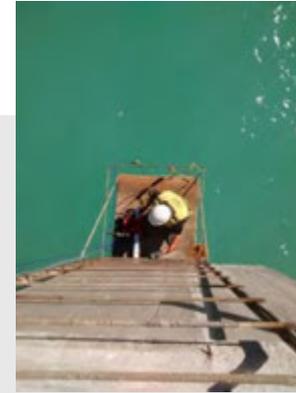
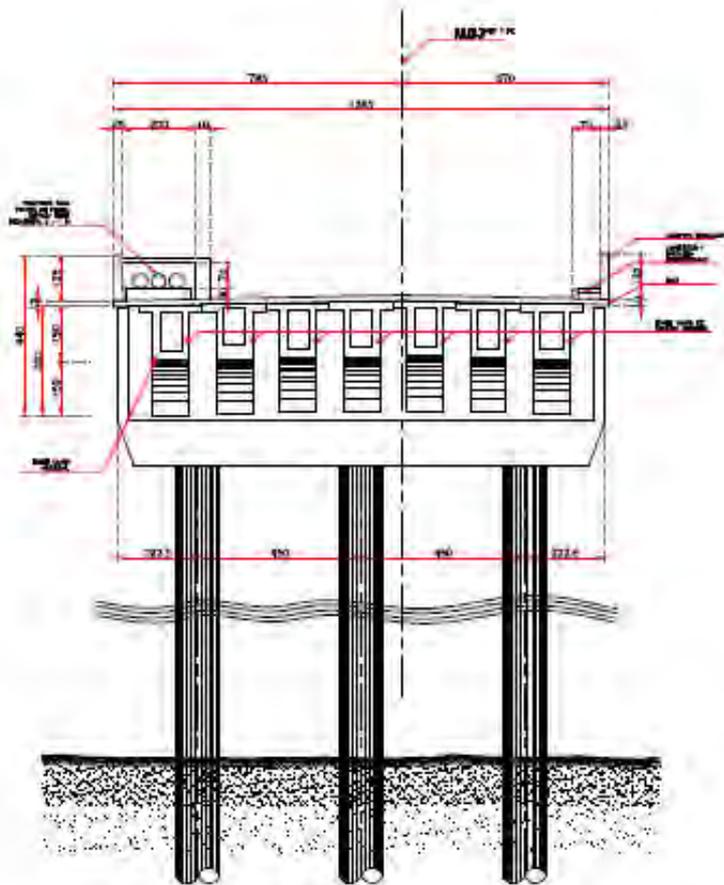
$$C_x = C_s \cdot \left( 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{x}{2\sqrt{D_{ns} \cdot t}} \right] \right)$$



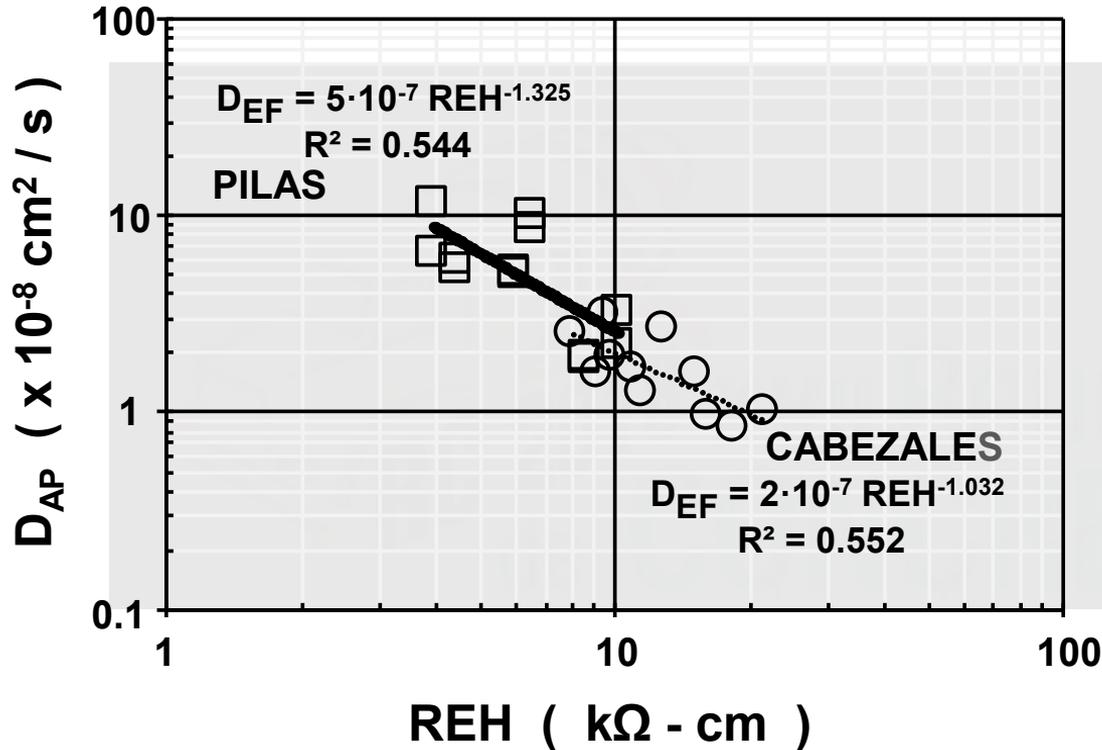
# *Puentes en Península de Yucatán: Progreso*



# Puentes en Península de Yucatán: Progreso



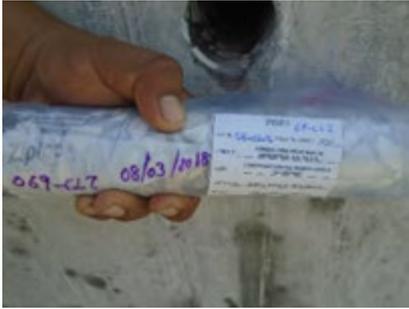
# Puente en Península de Yucatán: Progreso



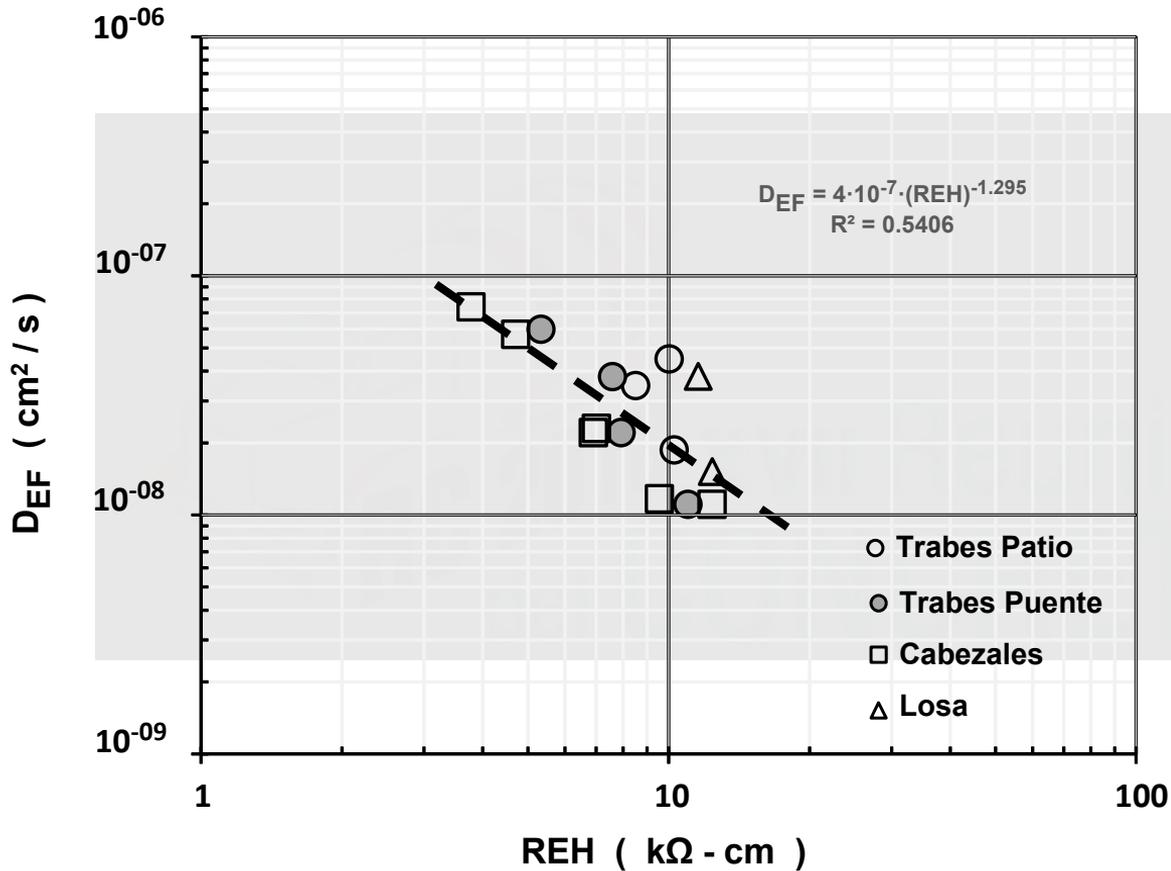
# *Puentes en Península de Yucatán: Campeche*

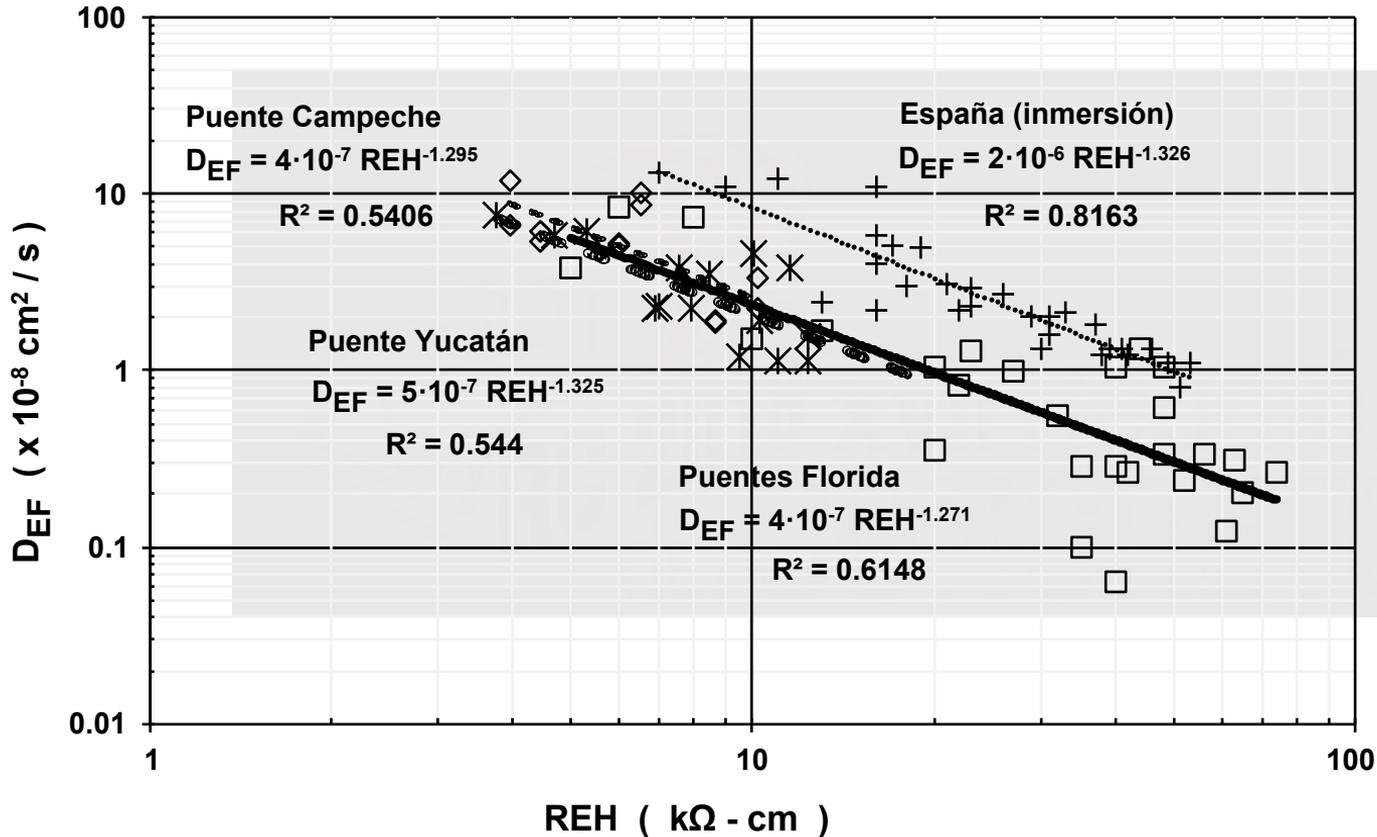


# Puentes en Península de Yucatán: Campeche



# Puentes en Península de Yucatán: Campeche

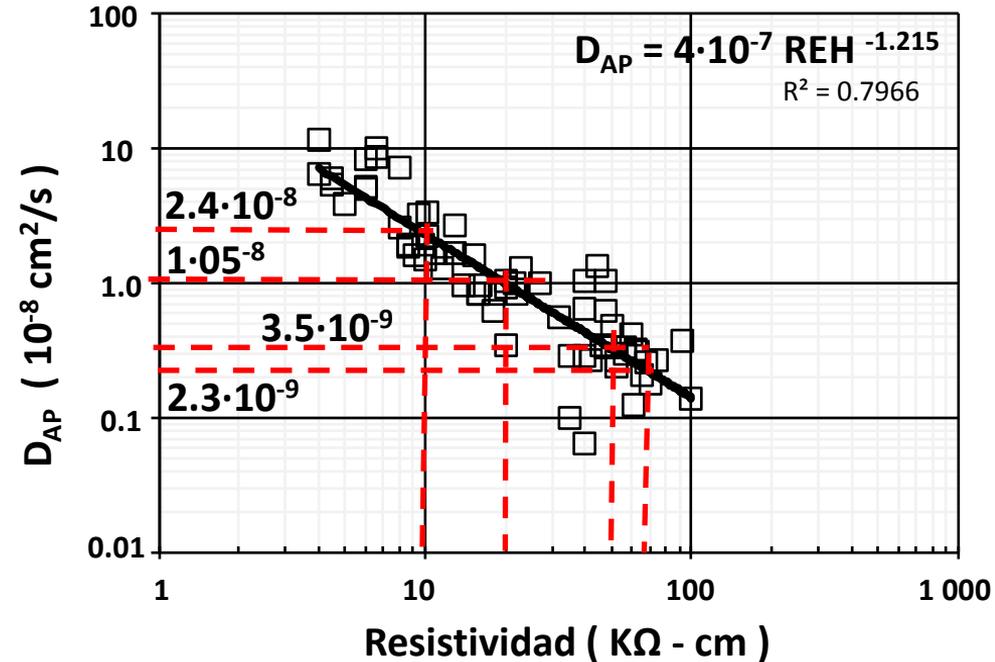




# Diseño por resistividad eléctrica en ambiente marino

$$C_x = C_s \cdot \left( 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{x}{2\sqrt{D_{ns} \cdot t}} \right] \right)$$

*Sustituyendo "t" de 2da Ley de Fick:*  
*C<sub>x</sub> = 1% (Cl- @ profund. acero)*  
*C<sub>s</sub> = 3.5% (Cl- en superficie)*  
*x = 10 cm (recubrimiento)*



*Datos obtenidos en puentes de la Florida, USA, y México*

# Diseño por resistividad eléctrica en ambiente marino

Para  $x = 10$  cm (recubrimiento):  $F.S. = 1.5$   
**(PILAS)**

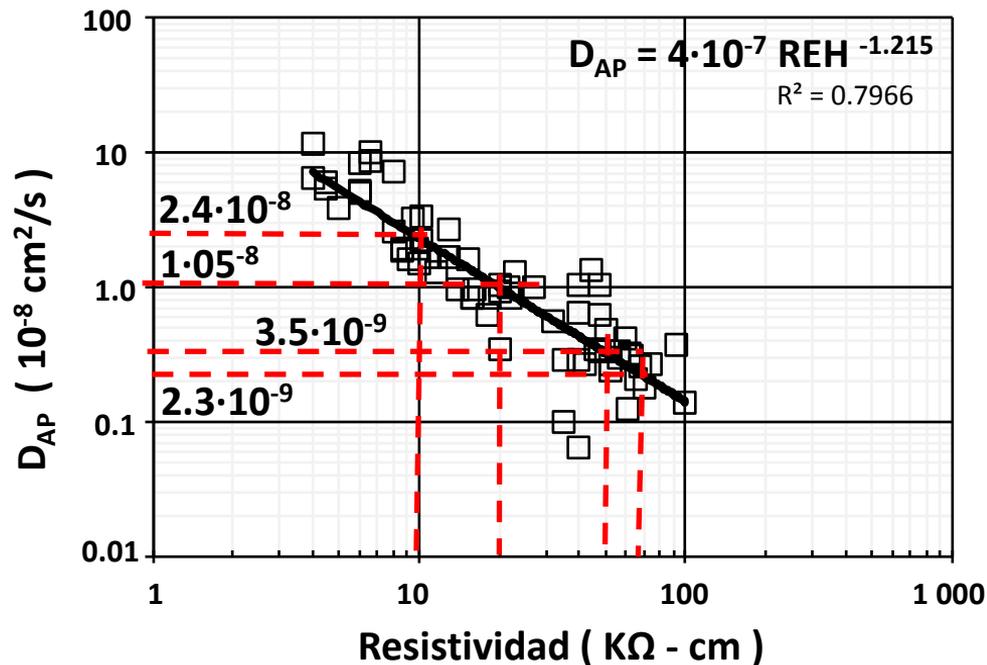
$t = 1.394 \cdot 10^{-6} / D_{AP}$       Sustituyendo  $D_{AP}$ :

Para  $10 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow$  Vida Diseño = 39 años  
 $D_{AP} \approx 2.438 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$

Para  $20 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow$  Vida Diseño = 88 años  
 $D_{AP} \approx 1.05 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$

Para  $50 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow$  Vida Diseño = 269 años  
 $D_{AP} \approx 3.45 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$

Para  $70 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow$  Vida Diseño = 405 años  
 $D_{AP} \approx 2.29 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$



# Diseño por resistividad eléctrica en ambiente marino

Para  $x = 7$  cm (recubrimiento): F.S. = 1.5  
(CABEZALES)

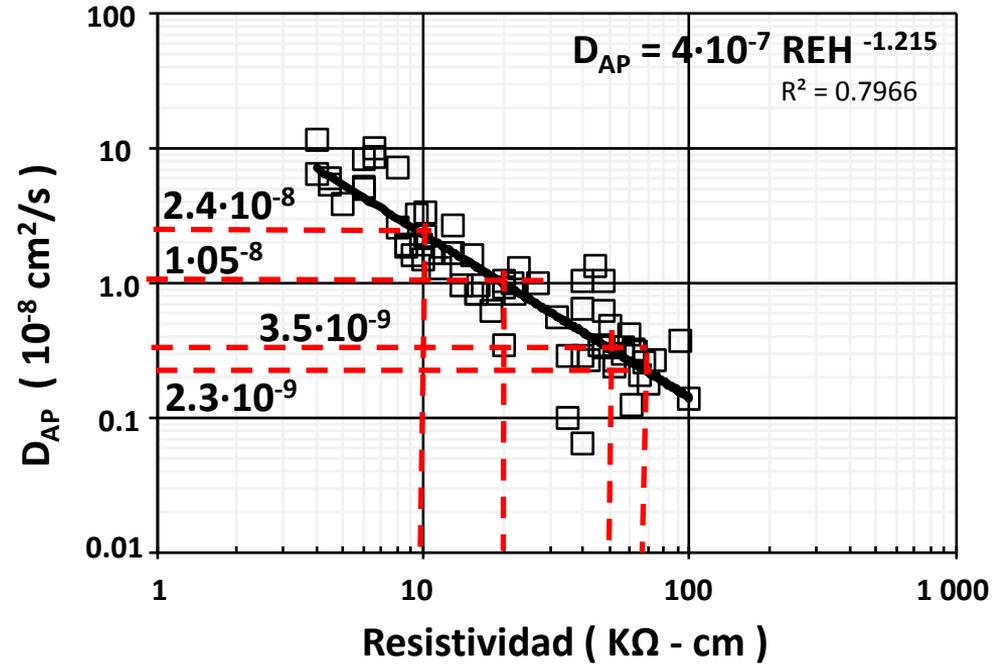
$t = 1.394 \cdot 10^{-6} / D_{AP}$       Sustituyendo  $D_{AP}$ :

Para  $10 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow$  Vida Diseño = 19 años  
 $D_{AP} \approx 2.438 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$

Para  $20 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow$  Vida Diseño = 43 años  
 $D_{AP} \approx 1.05 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$

Para  $50 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow$  Vida Diseño = 132 años  
 $D_{AP} \approx 3.45 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$

Para  $70 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow$  Vida Diseño = 199 años  
 $D_{AP} \approx 2.29 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$



# Diseño por resistividad eléctrica en ambiente marino

Para  $x = 5 \text{ cm}$  (recubrimiento):  $F.S. = 1.5$   
**(TRABES PREFABRICADAS)**

$t = 3.487 \cdot 10^{-7} / D_{AP}$       Sustituyendo  $D_{AP}$ :

Para  $10 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow \text{Vida Diseño} = 9 \text{ años}$

$D_{AP} \approx 2.438 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$

Para  $20 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow \text{Vida Diseño} = 23 \text{ años}$

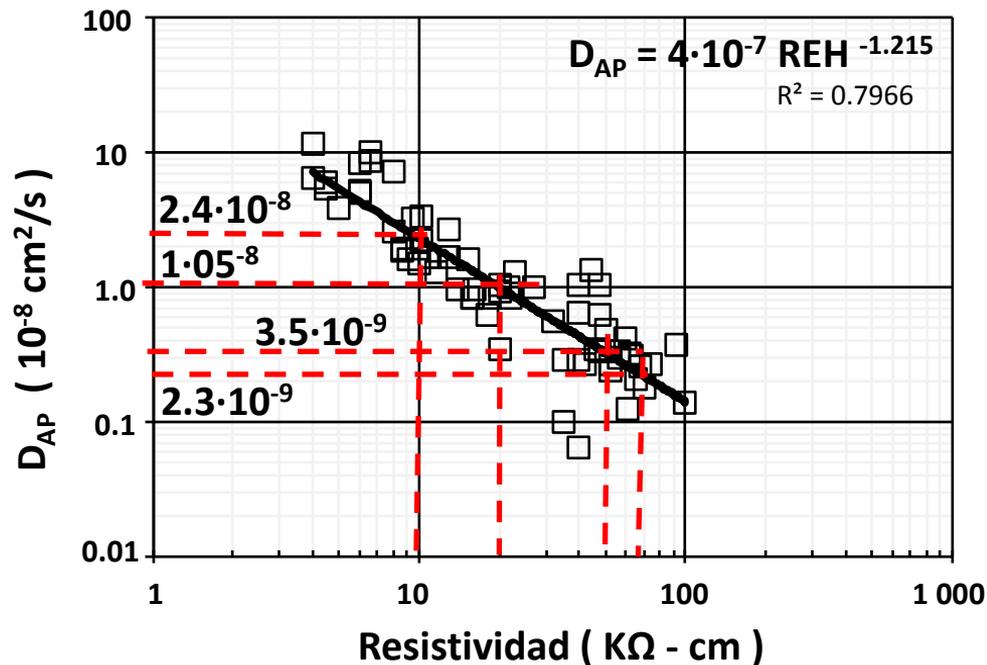
$D_{AP} \approx 1.05 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$

Para  $50 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow \text{Vida Diseño} = 68 \text{ años}$

$D_{AP} \approx 3.45 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$

Para  $70 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow \text{Vida Diseño} = 101 \text{ años}$

$D_{AP} \approx 2.29 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$



# Diseño por resistividad eléctrica en ambiente marino

Para  $x = 3$  cm (recubrimiento):  $F.S. = 1.5$

$t = 1.255 \cdot 10^{-7} / D_{AP}$       Sustituyendo  $D_{AP}$ :

Para  $10 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow$  Vida Diseño = 4 años

$$D_{AP} \approx 2.438 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Para  $20 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow$  Vida Diseño = 8 años

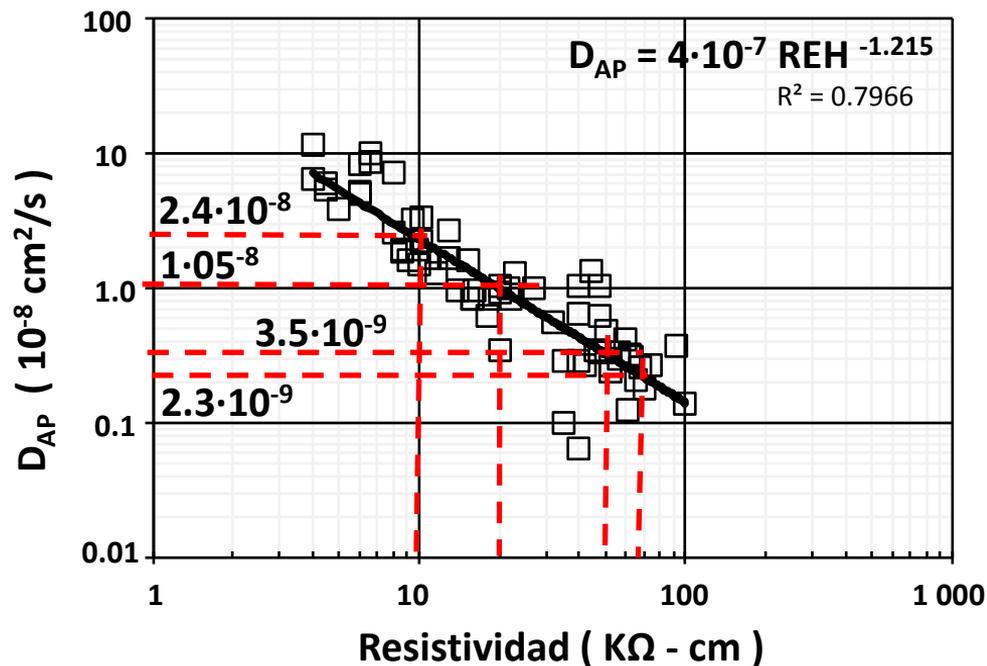
$$D_{AP} \approx 1.05 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Para  $50 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow$  Vida Diseño = 24 años

$$D_{AP} \approx 3.45 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$$

Para  $70 \text{ K}\Omega - \text{cm} \rightarrow$  Vida Diseño = 36 años

$$D_{AP} \approx 2.29 \cdot 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$$



## **Diseño de Mezclas de concreto por desempeño:**

- |                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| 1. Tipo:                             | Autoconsolidable   |
| 2. w/c ratio:                        | $\leq 0.35$  |
| 3. Cont. cementante:                 | $\geq 480 \text{ kg/m}^3$                                |
| 4. Microsilica                       | 5 - 8%   |
| 5. Resistencia a Compresión:         | $\geq 40 \text{ MPa @ 7 días (Aprox. 80 MPa @ 90 días)}$ |
| 6. Resistividad eléctrica húmeda     | $\geq 50 \text{ K}\Omega\text{-cm (90 days)}$            |
| 7. Perm. Rápida de Cl <sup>-</sup> . | $\leq 500 \text{ Coulomb (90 days)}$                     |
| 8. Revenim. inicial                  | 2 - 5 cm   |
| 9. Extensibilidad                    | $65 \pm 5 \text{ cm @ 10 cm fall distance}$              |
| 10. Permanencia                      | $\approx 3 \text{ hours}$                                |
| 11. Endurecimiento inicial           | $\approx 10 \text{ hours}$                               |
| 12. Tiempo min. curado               | 21 days  |

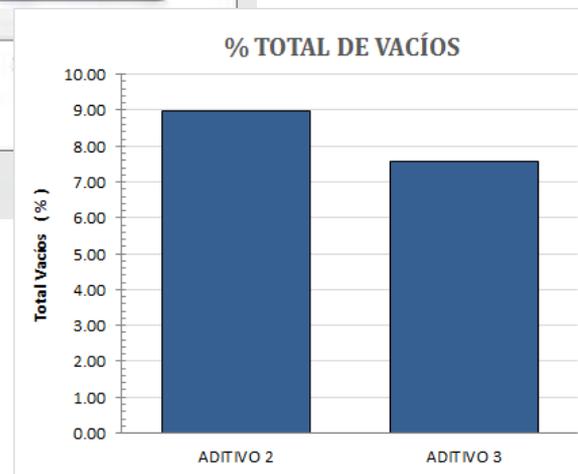
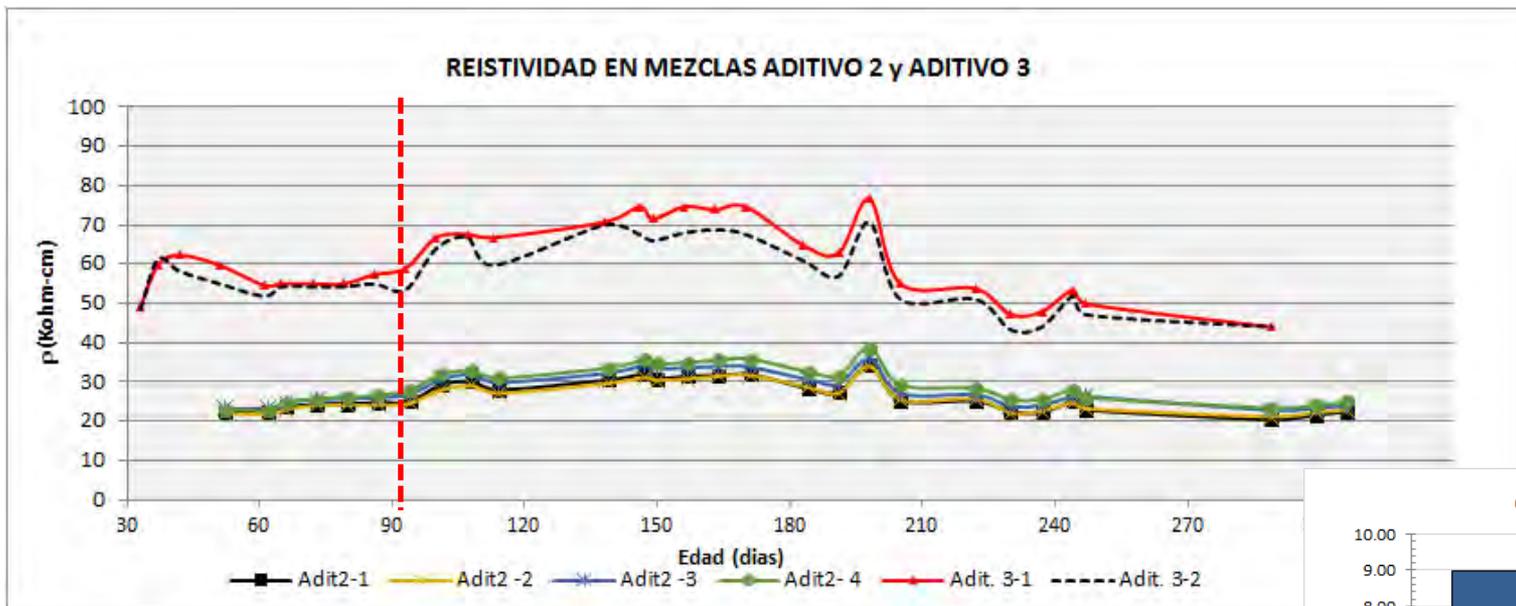
PROPIEDADES FÍSICAS	GRAVA		
	Agreg 1. 1/2"	Agreg 2. 3/4"	Agreg 3. 3/4"
DENSIDAD Kg/m <sup>3</sup>	2,449	2,392	2,308
ABSORCIÓN %	5.26%	7.07%	7.07%
HUMEDAD %	3.00%	6.30%	4.10%
MÓDULO DE FINURA (Adim.)	-	-	-

PROPIEDADES FÍSICAS	ARENA		
	Agreg 1. 3/16"	Agreg 2. 3/16"	Agreg 3. 3/16"
DENSIDAD Kg/m <sup>3</sup>	2,427	2,404	2,463
ABSORCIÓN %	4.17%	4.17%	2.84%
HUMEDAD %	3.85%	4.50%	6.03%
MÓDULO DE FINURA (Adim.)	2.98	2.77	3.45

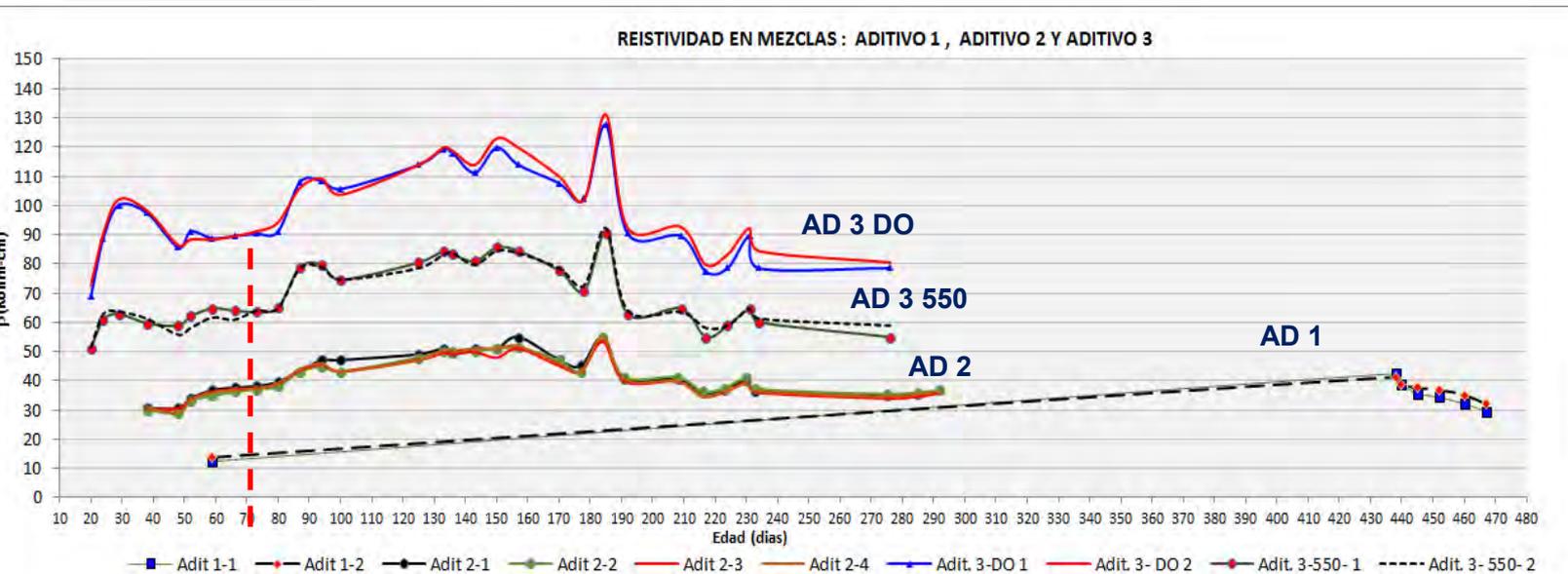
De los tres bancos analizados, el que cumple con las características de densidad  $>2,400$  kg/m<sup>3</sup> (en grava), una granulometría aceptable en arena y grava y un módulo de finura menor a 3, fue el banco Agregados 1, por lo que de éste se tomaron los agregados para las mezclas 1 y 2, y del banco Agregados 2 para la mezcla 3.

Composición de la mezcla	Mezcla Aditivo 3 Cemento 1 CPO 40 R RS	Mezcla Aditivo 2 Cemento 1 CPC 40 R
Cemento kg/m <sup>3</sup>	480.00	518.40
Arena Caliza kg/ m <sup>3</sup>	945.00	853.86
Grava Caliza kg/ m <sup>3</sup>	635.00	698.61
Agua lts/ m <sup>3</sup>	220.00	165.00
Aditivo "A" kg/m <sup>3</sup>	6.24	-
Aditivo "C" kg/m <sup>3</sup>	0.96	-
Aditivo "D"	-	8.09
MSA (8%)	38.40	-
Aire (%)	1%	2%



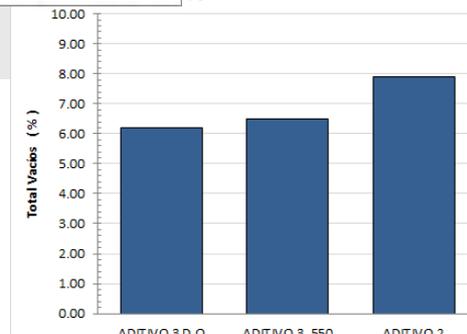


Mezcla	Edad de ensayo (días)	Coulombs	Nivel de permeabilidad
Aditivo 3	318	496	Muy bajo
Aditivo 2	318	1097	Bajo

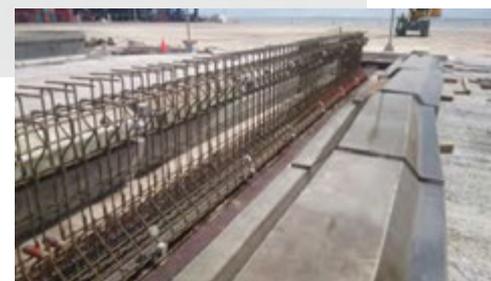


% TOTAL DE VACÍOS

Mezcla	Edad de ensayo (días)	Coulombs	Nivel de permeabilidad
Aditivo 3 D.O	304	233	Muy bajo
Aditivo 3 550		299	Muy bajo
Aditivo 2	318	622	Muy bajo



# Supervisión por durabilidad durante la construcción



# Supervisión por durabilidad durante la construcción



# Supervisión por durabilidad durante la construcción



CAJA NO. 2 DEL SEGUNDO ENVÍO



CAJA RECIBIDA DEL SEGUNDO ENVÍO



MUESTRAS DEL SEGUNDO ENVÍO



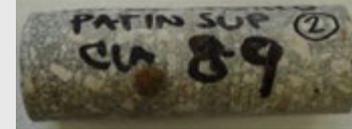
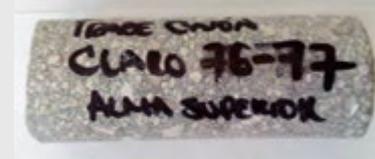
CAJA NO. 1, TERCER ENVÍO



CAJA NO. 2, TERCER ENVÍO



MUESTRA DEL TERCER ENVÍO



CAJA NO. 6, CUARTO ENVÍO



MUESTRAS DEL CUARTO ENVÍO

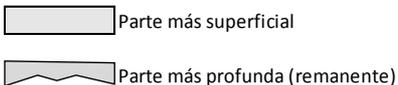


CAJA NO. 2, QUINTO ENVÍO

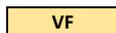
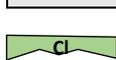


# Supervisión por durabilidad durante la construcción

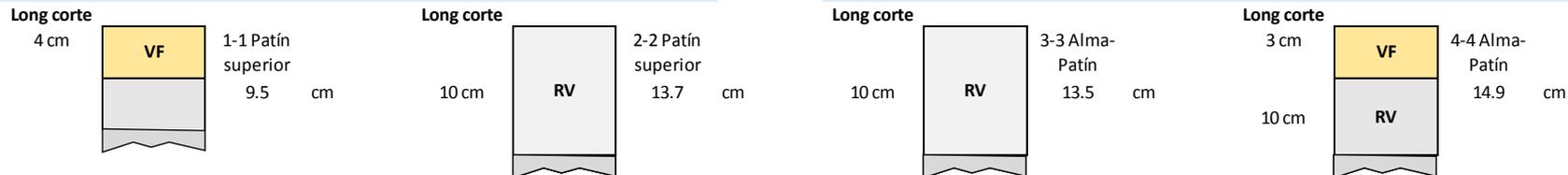
## Simbología de profundidad de las partes



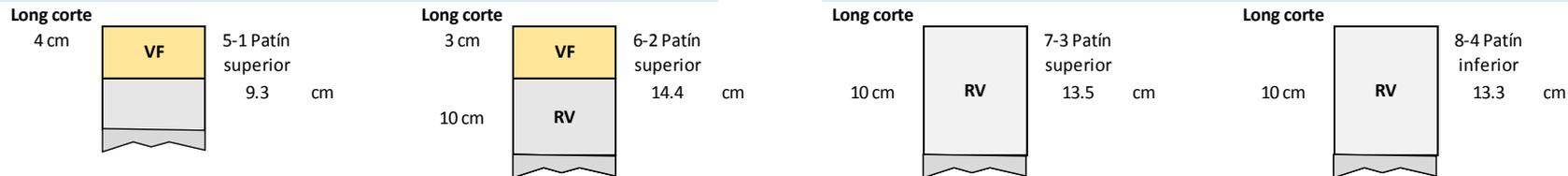
## Simbología de acuerdo a la propuesta de las prueba de destino

	<<	Prueba de Cloruros (2-3 cm)
	<<	Pruebas de % Vacíos y Fagerlund (4-5 cm)
	<<	Pruebas de compresión, VPU y resistividad (10 cm)
	<<	Para pulverizar

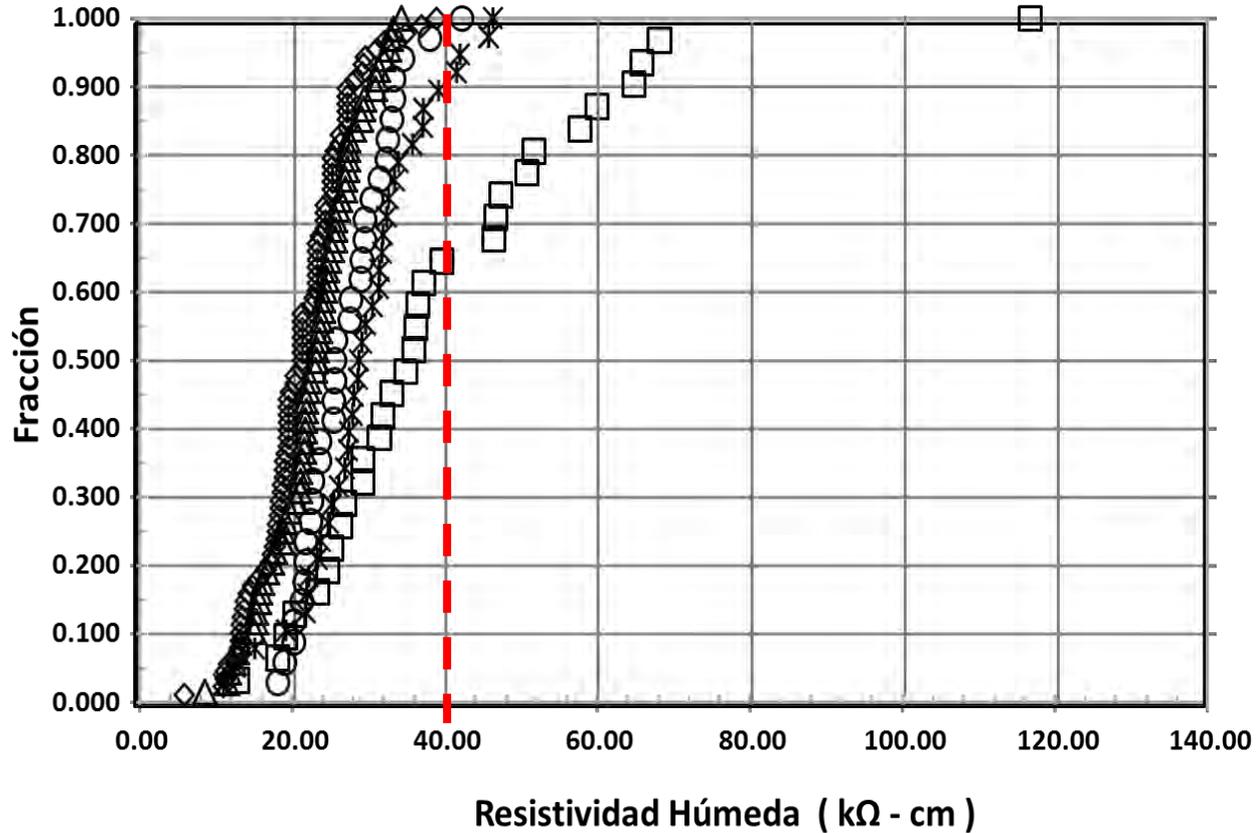
## EJE 7-8



## EJE C.4.1



# Supervisión por durabilidad durante la construcción



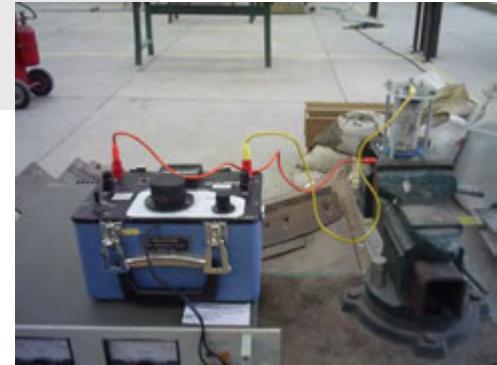
$$\rho = R_{\epsilon} \left( \frac{A}{L} \right)$$

Donde:

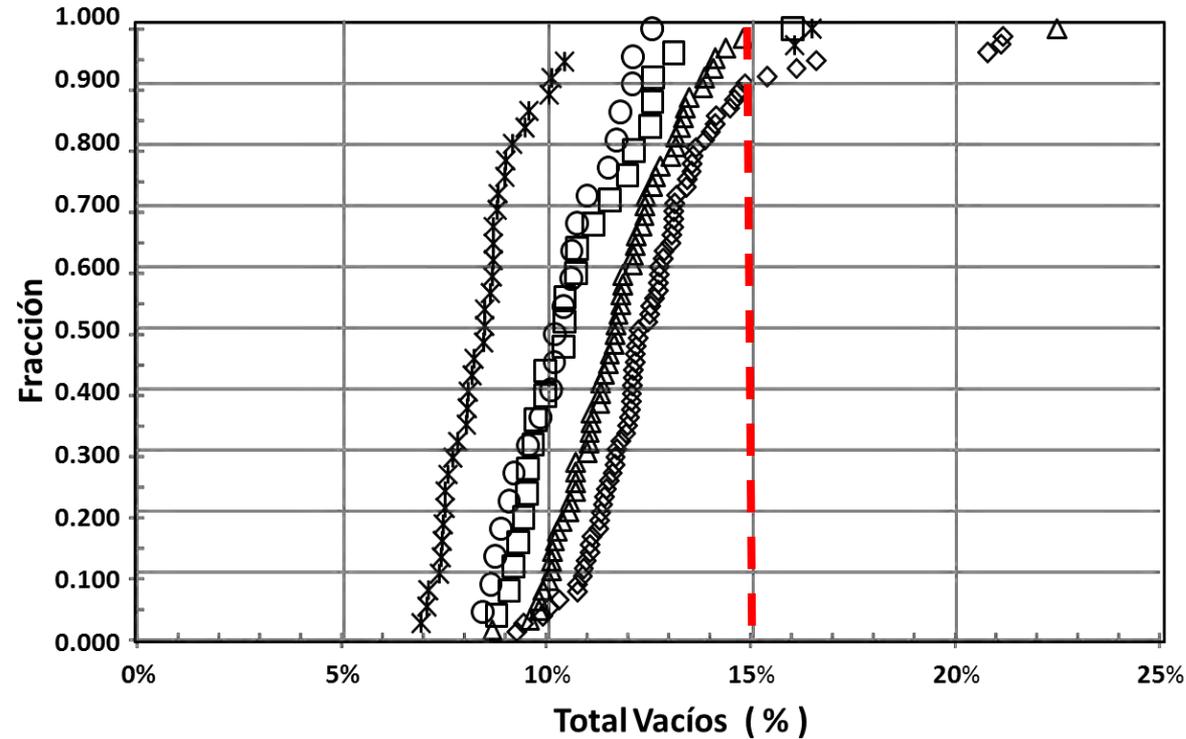
A= Área transversal del espécimen

L= Longitud del espécimen

- Serie 1
- Serie 2
- △ Serie 3
- ◇ Serie 4
- ✱ Serie 5



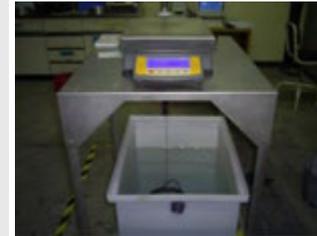
# Supervisión por durabilidad durante la construcción



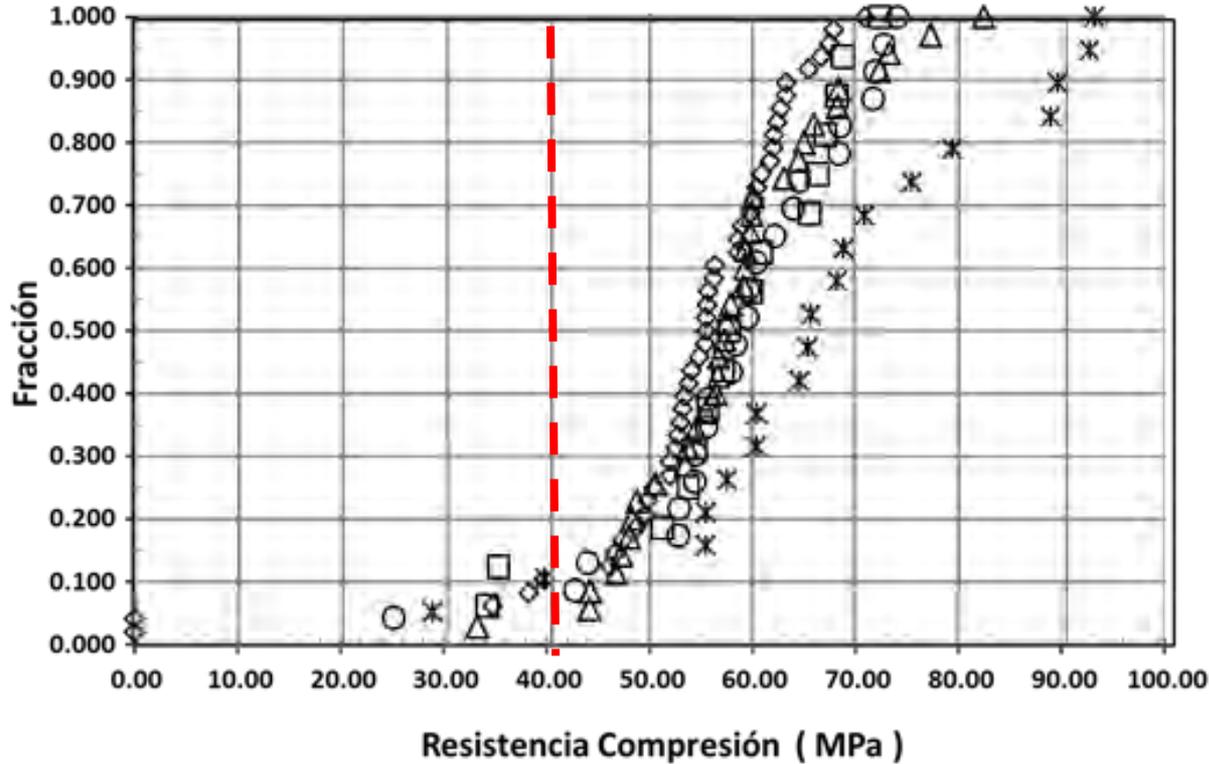
PORCENTAJE TOTAL DE VACIOS, TODAS LAS SERIES

$$\% \text{ de Porosidad Total} = \frac{W_{\text{saturado}} - W_{105^{\circ}\text{C}}}{W_{\text{saturado}} - W_{\text{sumergido}}} \times 100$$

- Serie 1
- Serie 2
- △ Serie 3
- ◇ Serie 4
- ✕ Serie 5



# Supervisión por durabilidad durante la construcción



RESISTENCIA A LA COMPRESION, TODAS LAS SERIES



# GRACIAS POR SU ATENCIÓN

