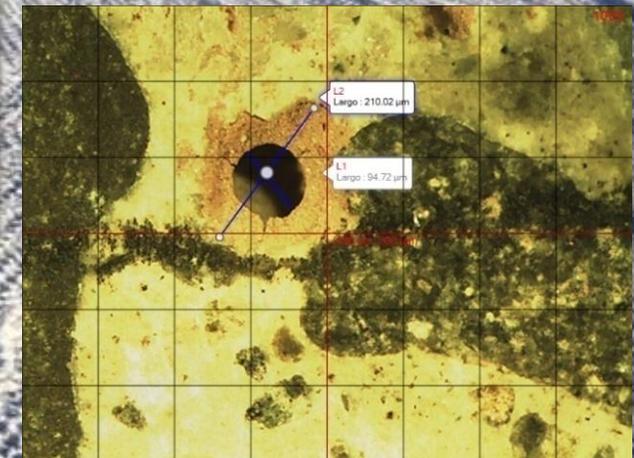


# Consideraciones teóricas, normativas y prácticas del uso del hormigón en Clima Frío

Hormigón en  
Clima Frío



Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

# Ocurrencia de ciclos hielo/deshielo

---

## Contenido

1. Estado del Arte
  - a) Mecanismos de Deterioro
  - b) Tipos de Deterioro
  - c) Cuantificación de los efectos
2. Las Normas
  - a) Ensayos de Desempeño
  - b) Propuesta de Zonificación Nacional para H/D
3. La Práctica
  - a) Requisitos al Hormigón
  - b) Fabricación del Hormigón
  - c) Aspectos constructivos
4. Propuesta

Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.



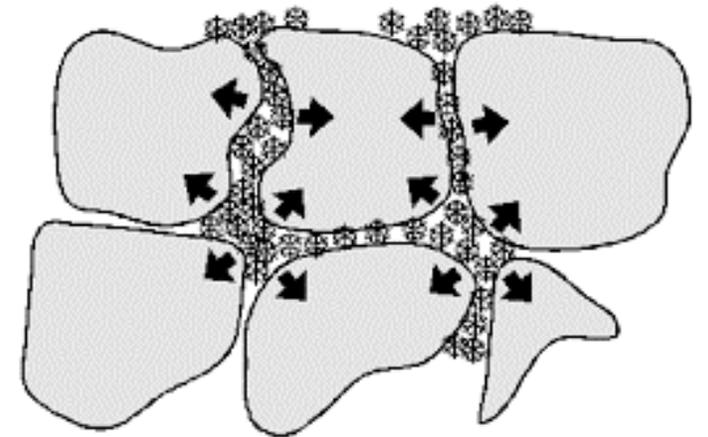
***La Teoría***

**o**

***Estado del Arte***

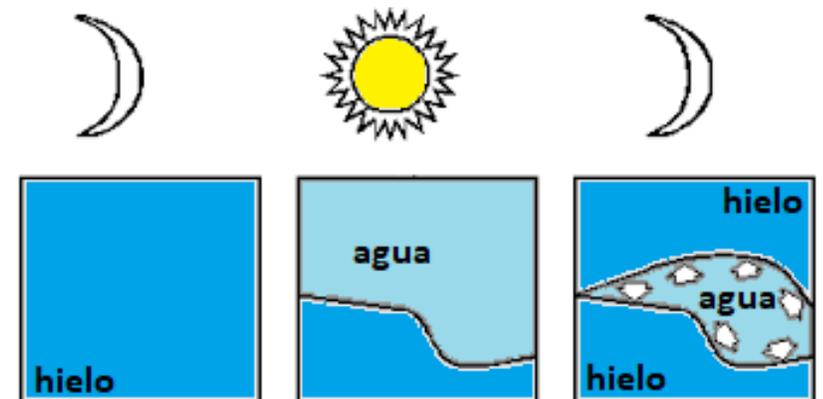
# Mecanismo de Deterioro

- Los poros del hormigón se encuentran parcialmente llenos de agua.
- La temperatura externa disminuye a valores  $T < 0^{\circ}\text{C}$  ocurriendo congelación.
- Se generan internamente en el hormigón cristales de hielo que inducen a presiones a nivel de las paredes de los poros. Las presiones hidráulicas son causadas por la expansión del **8%** del agua al congelarse. Si las presiones son mayores a la resistencia a la tracción en las paredes, ocurren daños no recuperables.



# Mecanismo de Deterioro

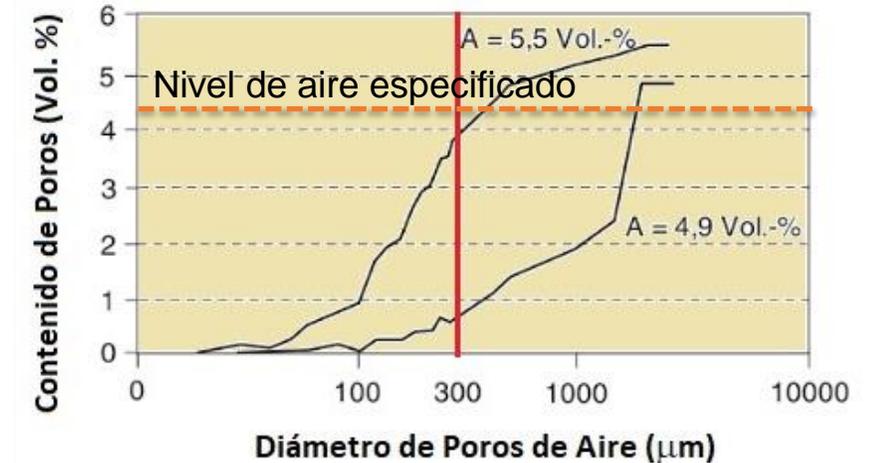
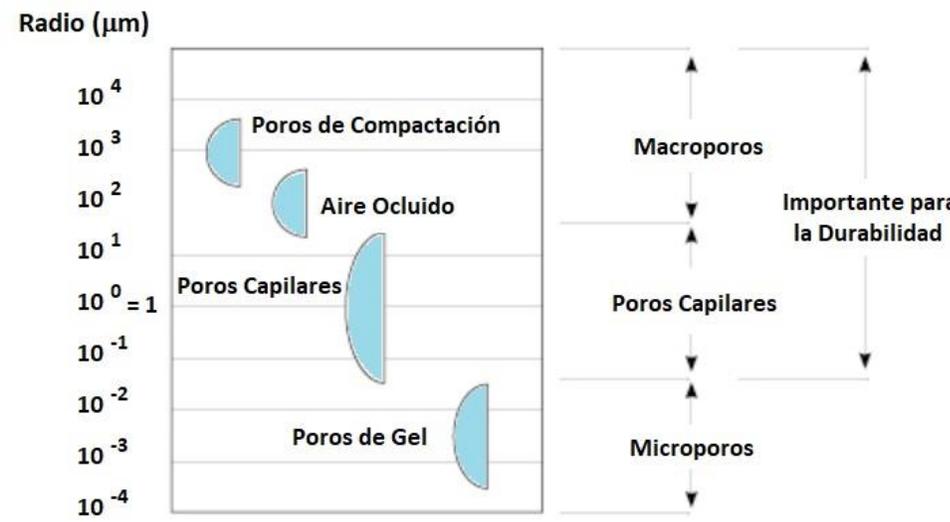
- Se identifica un **Punto Crítico de Saturación** de un 90% (% de llenado de poros con agua), sobre el cual se generan estas presiones.
- La temperatura externa aumenta luego a valores  $T > 0^{\circ}\text{C}$  ocurriendo el **deshielo**.
- El proceso de congelación y posterior deshielo se denomina ciclo de **Hielo/Deshielo**, y el deterioro generado es **acumulativo**. El daño depende directamente de la cantidad de agua disponible (razón a/c) y de la cantidad de ciclos.
- La ocurrencia de los ciclos Hielo/Deshielo ocurre en forma natural en zonas de Clima Frío por el efecto de las variaciones de temperatura nocturnas y diurnas.



# Mecanismo de Deterioro

## 1. Estado del Arte

- El uso de **sales descongelantes** para permitir el derretimiento del hielo superficial y así habilitar las vías al tráfico vehicular y/o peatonal, disminuye el **Punto de Congelación** a un valor que se considera en **-2°C**.
- La inclusión de aditivos **incorporadores de aire** entrega a la pasta de cemento un volumen interno adicional para que ocurra la expansión del hielo, reduciendo el riesgo de daños.



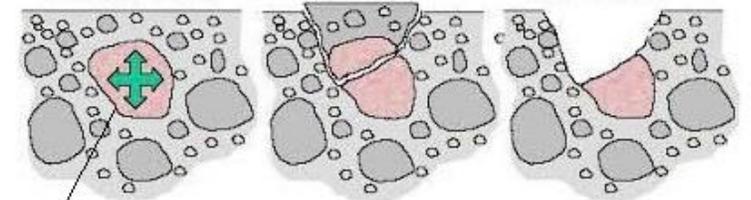
Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

# Tipos de Deterioro

- La meteorización superficial es la disolución o rompimiento de partículas pequeñas o de capas delgadas de hormigón durante el ciclo de hielo/deshielo, generando un **descascaramiento**.
- Las juntas y fisuras en pavimentos son las zonas donde el hormigón suele estar más saturado y aumenta por lo tanto el riesgo de agrietamiento. Esta falla del pavimento puede resultar en la desintegración completa de toda la losa (**D-cracking**)
- Además, puede ocurrir un desprendimiento local sobre **agregados sensibles al frío** ubicados cerca de la superficie, llamados "pop-outs".



Superficie del Hormigón sometido a Hielo/Deshielo



Partícula de Agregado saturada

# Ejemplos de Deterioros

## 1. Estado del Arte



Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

# Cuantificación de los efectos

---

Los principales factores incidentes en la ocurrencia de daños por efecto de los ciclos Hielo/Deshielo son:

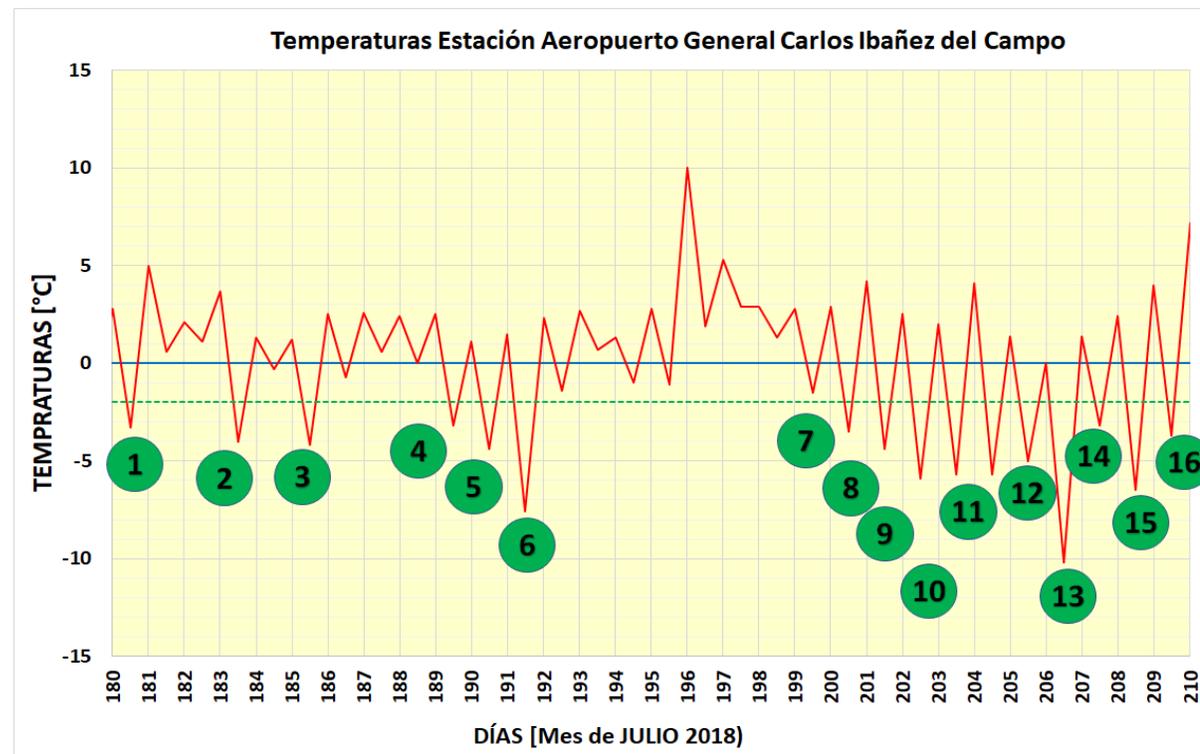
- 1) Cantidad de ciclos hielo/deshielo
- 2) Presencia de sales descongelantes (período invernal)
- 3) Presencia de humedad (Saturación > 90%)

# Cuantificación de los efectos

## 1. Estado del Arte

### 1) Cuantificación de Ciclos Hielo/Deshielo

- Debe analizarse el período anual completo para identificar la situación, definiendo de antemano el uso o no de sales descongelantes que reducirán el Punto de Congelación.



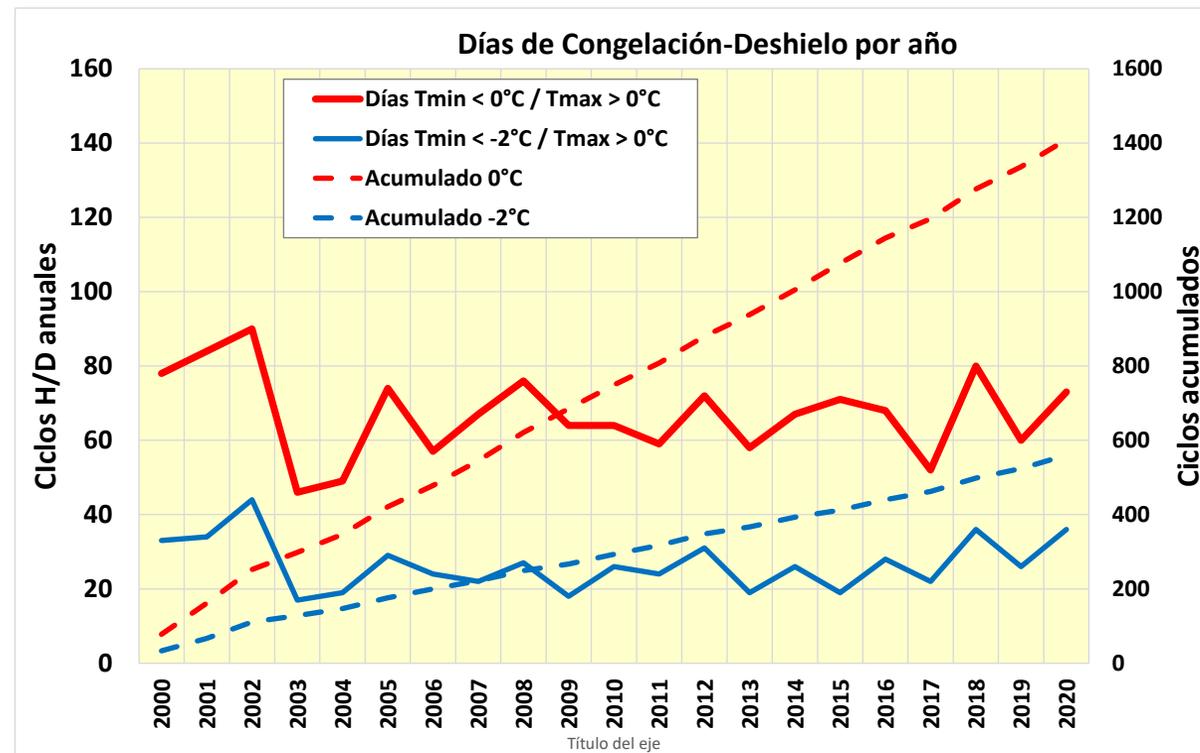
Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

# Cuantificación de los efectos

## 1. Estado del Arte

### 1) Cuantificación de Ciclos Hielo/Deshielo

- Se determina la cantidad de ciclos anuales y el acumulado anual.
- El efecto de las sales disminuye la cantidad de ciclos perjudiciales aprox. a la mitad.



Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

# Cuantificación de los efectos

---

## 1. Estado del Arte

### 2) Presencia de Sales

- Ocurre el fenómeno de la congelación por capas en elementos que están sujetos a ciclos hielo/deshielo y adicionalmente expuesto a sales descongelantes.



Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

# Cuantificación de los efectos

## 1. Estado del Arte

### 3) Presencia de Humedad

Grado	Descripción	Mínimo grado de Resistencia especificado (MPa)	Aire total (%)	Tamaño máx árido D <sub>n</sub> (mm)
<b>F0</b>	Hormigón <b>no</b> expuesto a descongelación y deshielo	Sin restricción	Sin restricción	Sin restricción
<b>F1</b>	Hormigón expuesto a congelación y deshielo y <b>ocasionalmente expuesto a humedad</b>	<b>G30</b>	6,0 5,0 4,5	10 20 40
<b>F2</b>	Hormigón expuesto a congelación y deshielo y en contacto <b>continuo con humedad</b>	<b>G30</b>	7,5 6,0 5,5	10 20 40
<b>F3</b>	Hormigón expuesto a congelación y deshielo y en contacto <b>continuo con humedad</b> y expuesto a productos químicos <b>descongelantes</b>	<b>G35</b>	7,5 6,0 5,5	10 20 40

Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

# Cuantificación de los efectos

## 1. Estado del Arte

### 3) Presencia de Humedad

Grado	Grado de Exposición	Descripción	Tipo de Estructura
<b>F0</b>	Hormigón <b>no</b> expuesto a congelación y deshielo	Elementos ubicados en zonas donde no ocurren, o sólo en baja cantidad, ciclos de hielo/deshielo	<b>Todas</b>
<b>F1</b>	Hormigón expuesto a congelación y deshielo y <b>ocasionalmente expuesto a humedad</b>	Elementos ubicados en zonas donde ocurren ciclos de hielo/deshielo, y las condiciones de ocurrencia de saturación del hormigón son bajas	<b>Interior</b> de estructuras o estructuras protegidas
<b>F2</b>	Hormigón expuesto a congelación y deshielo y en contacto <b>continuo con la humedad</b>	Elementos ubicados en zonas donde ocurren ciclos de hielo/deshielo con presencia de lluvias y nieve con condiciones de ocurrencia de saturación del hormigón son altas	<b>Exterior</b> de estructuras <b>sin presencia de sales</b>
<b>F3</b>	Hormigón expuesto a congelación y deshielo y en contacto <b>continuo con humedad</b> y expuesto a productos químicos <b>descongelantes</b>	Elementos ubicados en zonas donde ocurren ciclos de hielo/deshielo con presencia de nieve en invierno combinado con presencia de lluvias, nieve y/o agua de mar junto al uso de sales descongelantes, y con condiciones de ocurrencia de saturación del hormigón son altas	Pavimentos y superficies de estructuras viales en contacto directo o salpicaduras con <b>sales descongelantes</b>

Dr.-Ing. Luis Ebensperger M.

# Cuantificación de los efectos

1.  
Estado del Arte

## 3) Presencia de Humedad



F3

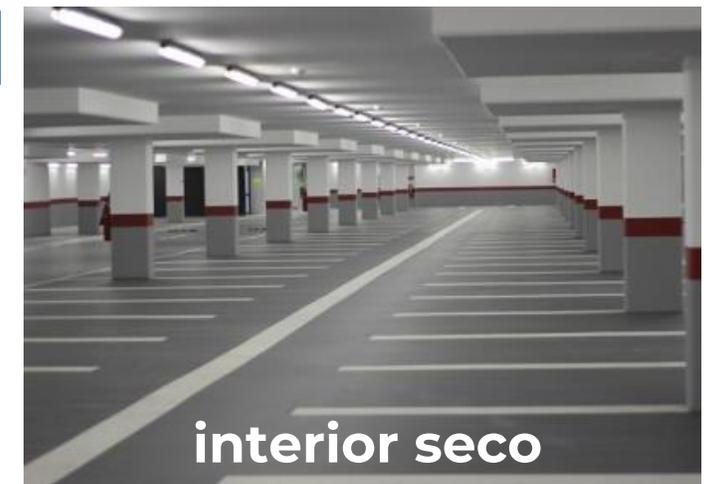
F3

F2



F2

F1





# ***La Normativa***

**o**

***Normas de Desempeño***

# Ensayos de Desempeño

---

**NCh170** – Hormigones: Capítulo 6.4 Tabla 4

6.4.1.3 Independiente del grado de exposición, se puede utilizar hormigones con resistencias y contenidos de aire distintos a los prescritos, si se demuestra mediante ensayos de comportamiento del hormigón que la expansión máxima obtenida  $\epsilon \leq \mathbf{0,05\%}$ .

Este ensayo se realiza según **NCh2185**, sobre probetas que tengan 28 días de edad.

2.  
Las Normas

Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

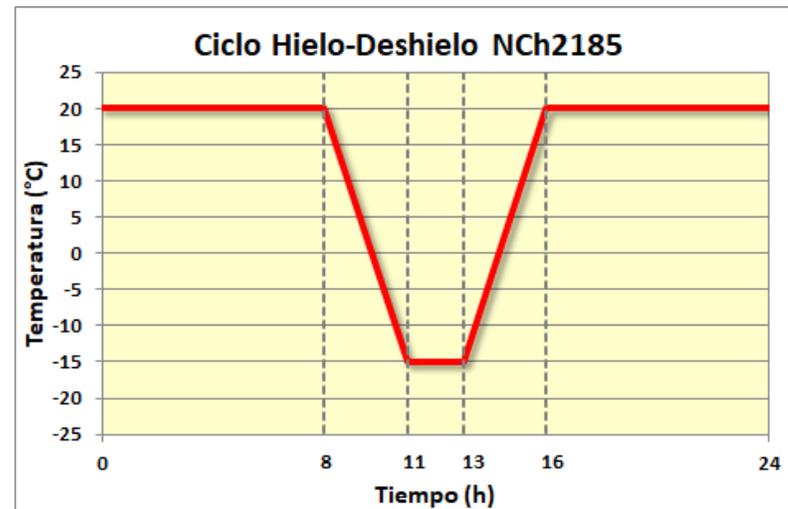
# Ensayos de Desempeño

## 2. Las Normas

**NCh2185** – Determinación de la Resistencia a la Congelación y el Deshielo - Método de Deformaciones

Este método de ensayo se basa en medir el **cambio de longitud** de 4 probetas prismáticas de 75x75x250 mm mantenidas en agua y sometidas a **50** ciclos de hielo-deshielo. **Duración = 50 días.**

Se ejecuta la medición inicial a las 72h. La expansión límite  $\epsilon = 0,05\%$ .



Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

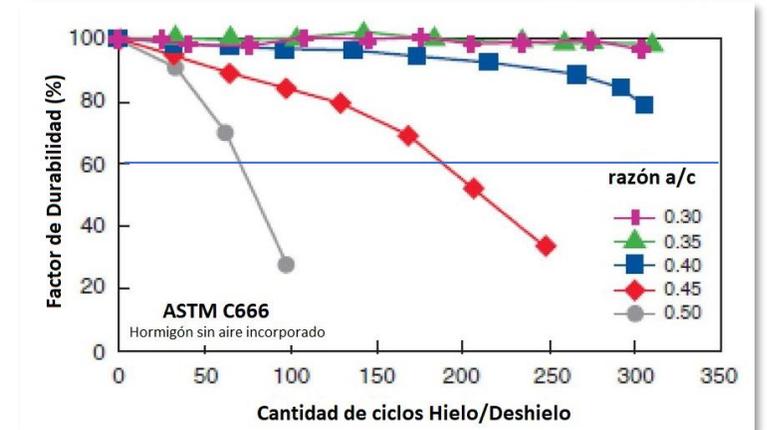
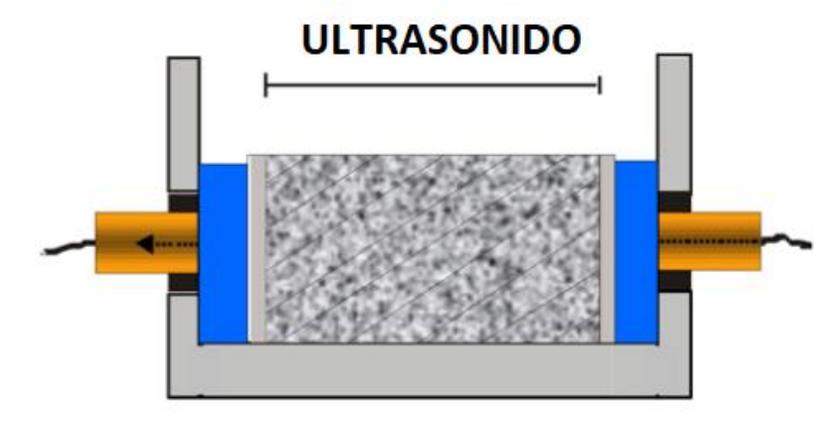
# Ensayos de Desempeño

## 2. Las Normas

**SIA 162/1 - Ensayo N°8** – Resistencia al Hielo/Deshielo sin Sales Descongelantes (ASTM C666)

El método de ensayo consiste en someter la muestra de hormigón a ciclos de congelación y descongelación, y determinar con la técnica de ultrasonido el valor del **Módulo Dinámico de Elasticidad** inicial, y luego en intervalos definidos de cantidad de ciclos, con un máximo de 300. **Duración = 50 días.**

El Factor de Durabilidad se determina para una reducción del Módulo a un 50% (60%) del valor inicial.



Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

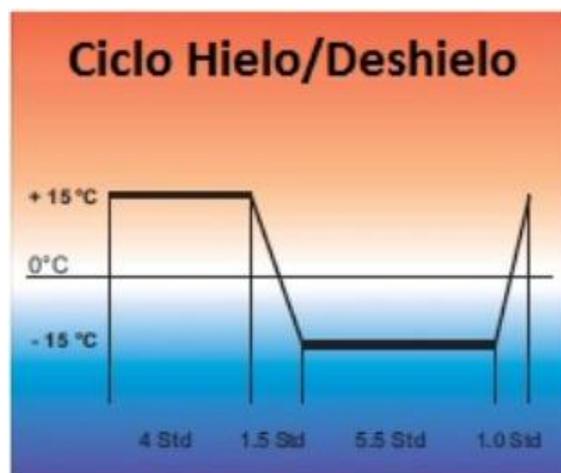
# Ensayos de Desempeño

## 2. Las Normas

**SIA 162/1 – Anexo C** – Resistencia al Hielo/Deshielo con Sales Descongelantes (ASTM C672)

El método de ensayo consiste en someter la muestra de hormigón a **28** ciclos de congelación y descongelación para determinar el descascaramiento superficial. **Duración = 14 días** (50 días).

La superficie de la muestra se cubre con una solución de NaCl al 3%, se mide a 3 edades la masa de material que se desprende después de someter la muestra a los ciclos de congelación y descongelación.



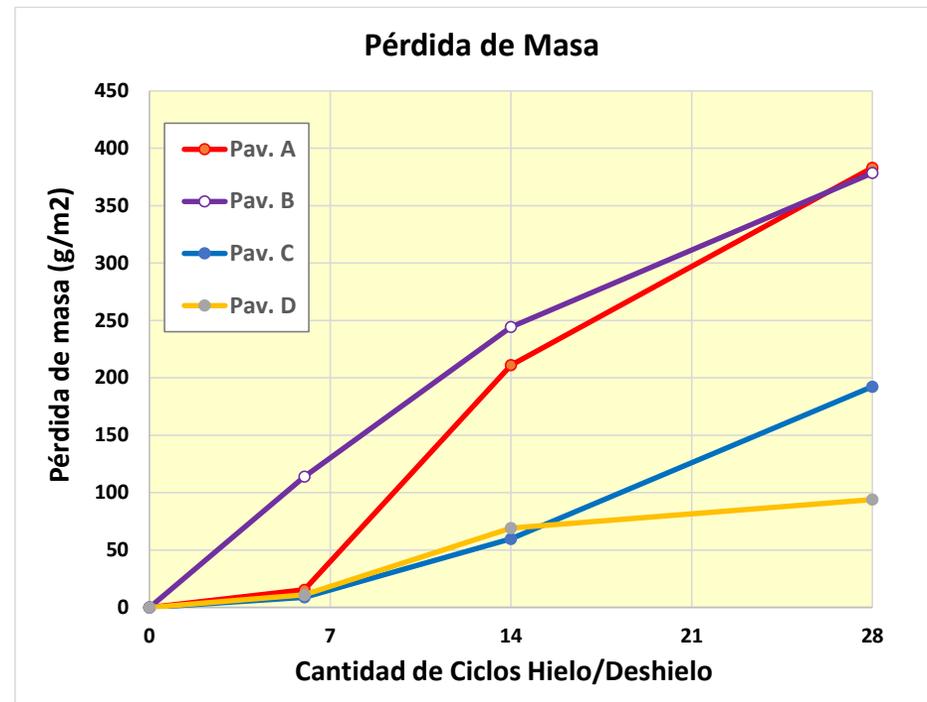
Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

# Ensayos de Desempeño

## 2. Las Normas

### SIA 162/1 – Anexo C

- Los valores  $< 200 \text{ g/m}^2$  (300) indican una Alta Resistencia al Hielo/Deshielo con Sales Descongelantes, y hasta  $1.200 \text{ g/m}^2$  (1.500) una Resistencia Media.



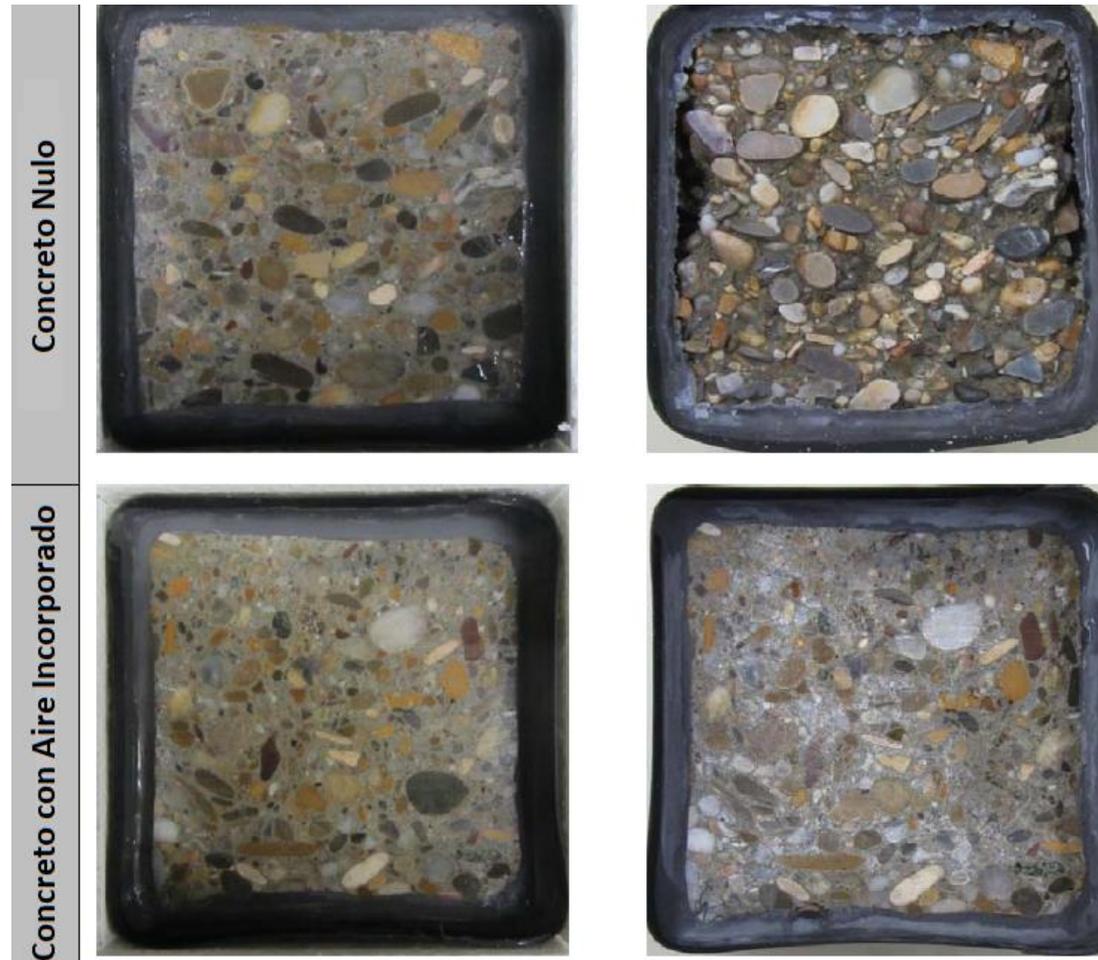
Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

Nota (x): testigos extraídos antes de 28d

# Ensayos de Desempeño

**SIA 162/1 - Anexo C** – Resistencia al Hielo/Deshielo con Sales Descongelantes

2.  
Las Normas



Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

# Ensayos de Caracterización

## 2. Las Normas

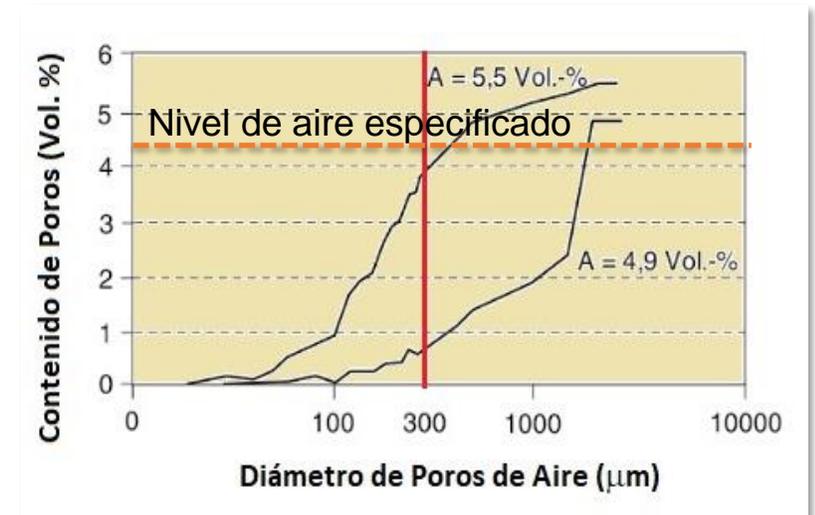


Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

**UNE EN 480-11** – Determinación microscópica de los parámetros del **sistema de poros de aire** del hormigón endurecido (ASTM C457 )

El método de ensayo contempla, con el apoyo de un microscopio (50 a 100 veces de aumento), la determinación de valores característicos de los poros del hormigón endurecido:

- a) Contenido de aire **A**
- b) Contenido de microporos de aire **A<sub>300</sub>**
- c) Factor de Espaciamiento **FE**

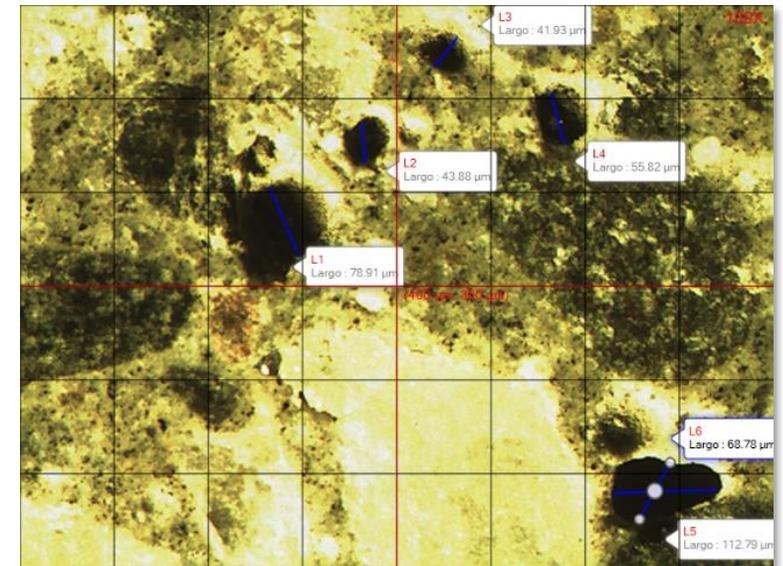
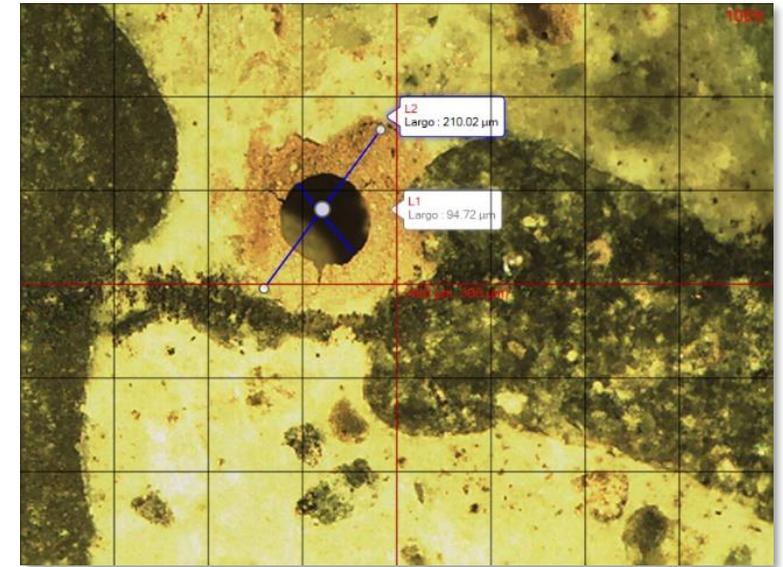


Lo anterior permite evaluar la distribución de poros de aire y determinar si el hormigón endurecido contiene los poros de aire requeridos para que éste cumpla con los requisitos establecidos.

# Ensayos de Caracterización

## 2. Las Normas

Corte de probetas perpendiculares a la superficie, que luego son pulidas, con imágenes del microscopio



Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

# Ensayos de Caracterización

## 2. Las Normas

**ASTM C457** – Determinación microscópica de los parámetros del sistema de poros de aire del hormigón endurecido (DIN EN 480-11)

Condición	Factor	Descripción	Recomendación valores límites
<b>Hormigón Fresco</b>	Contenido de Aire ( <b>A</b> ) (Vol. %)	En poros de compactación y de aire incorporado	<b>Según Exposición y Tamaño máximo</b>
<b>Hormigón Endurecido</b>	Contenido de Aire ( <b>A</b> ) (Vol. %)	En poros visibles en la pasta de cemento con una longitud de cuerda de máximo 4mm en la línea de medición.	-
	Contenido de microporos <b>A<sub>300</sub></b> (Vol. %)	En poros de aire esféricos hasta un diámetro máximo de 300 $\mu\text{m}$ .	<b>Mín 1,5</b>
	Factor de Espaciamiento ( <b>FE</b> ) (mm)	Mayor distancia de un punto de la pasta de cemento hasta el siguiente poro de aire.	<b>Máx 0,20</b>

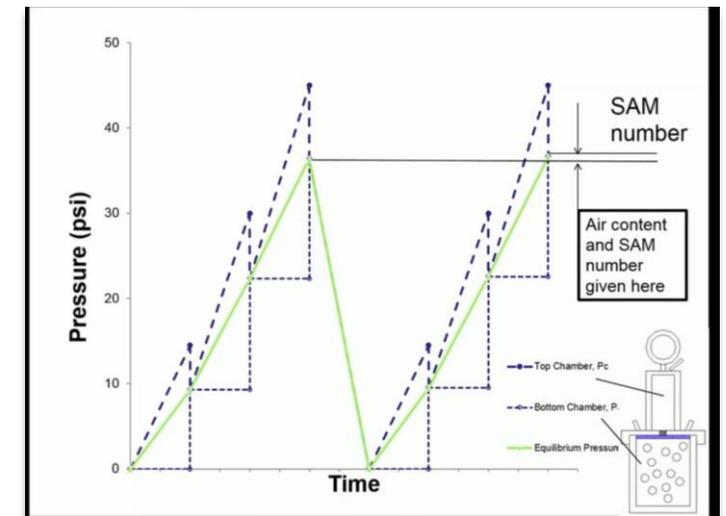
Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

# Ensayos de Caracterización

## 2. Las Normas

**AASHTO TP 118** – Método estándar de ensayo para la caracterización del sistema de vacío de aire del hormigón recién mezclado por el método de presión secuencial.

Este método cubre la determinación del contenido de aire y el índice **SAM** del hormigón recién mezclado a partir de la observación del cambio en el volumen del hormigón fresco al variar la presión de prueba, con posterioridad a la determinación habitual del contenido de aire. El índice SAM correlaciona con el tamaño de las burbujas de aire **A300** y el Factor de Distancia **FE**.



Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

# Propuesta Zonificación para H/D

## 2. Las Normas

Dr.-Ing. Luis Ebersperger M.

CLIMA		CICLOS HIELO/DESHIELO -2°C a 0°C				POSIBILIDAD ALCANZAR SATURACIÓN				
MAPA	CLIMA	COSTA	VALLE INTERMEDIO	ALTURA MEDIA	GRAN ALTURA	COSTA	VALLE INTERMEDIO	ALTURA MEDIA	GRAN ALTURA	
	SECO - ÁRIDO	0	0	28	251	Nula P < 10mm	Nula P < 10mm	Baja 10 < P < 50 mm	Alta P > 50mm	
				193*	192*			Baja 10 < P < 50 mm	Alta P > 50mm	
	SECO-SEMIÁRIDO	0	0	14*	273*	Nula P < 10mm	Nula < 10mm	Alta P > 50mm	Alta P > 50mm	
				14	83					
	TEMPLADO CON LLUVIAS EN INVIERNO	0	3	11	34*	Alta P > 50mm	Baja 10 < P < 50 mm	Alta P > 50mm	Alta P > 50mm	
				12	18*					98*
	TEMPLADO CON LLUVIAS TODO EL AÑO	7	7	12	18*	Alta P > 50mm	Alta P > 50mm	Alta P > 50mm	Alta P > 50mm	
				5	24					120*
				3	24					134*
				31	47					
FRÍO	72	72	40	83	Alta P > 50mm	Alta P > 50mm	Alta P > 50mm	Alta P > 50mm		
			17	166						

# Propuesta Zonificación para H/D

## 2. Las Normas

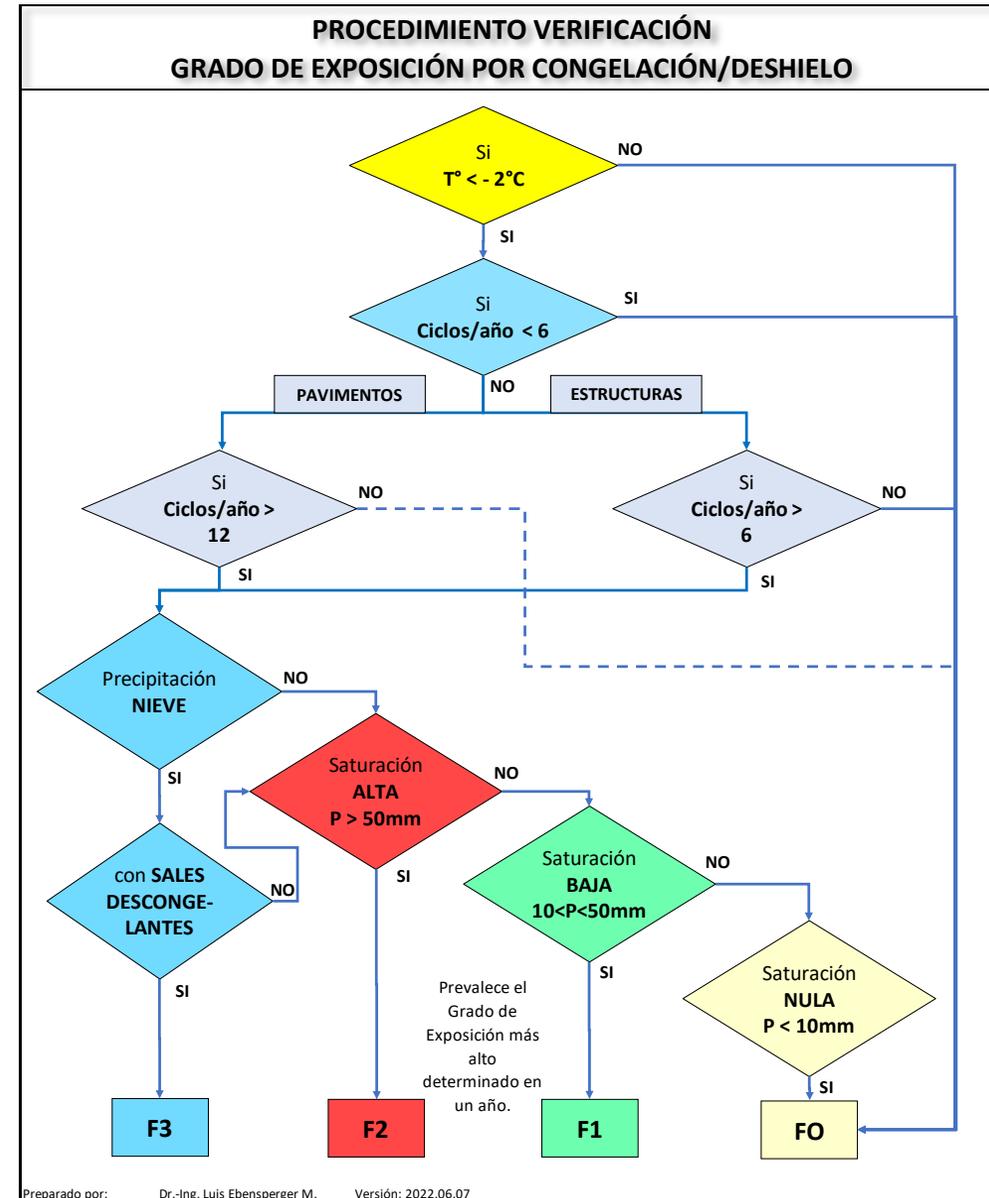
Tipos de Estructuras según Vida Útil:

- Pavimentos = 25 años
- Estructuras = 50 años
- Cantidad admisible de 300 Ciclos sin uso de incorporador de aire para un G30:
  - C/año = 12 para pavimentos
  - C/año = 6 para estructuras

Análisis mensual de la Simultaneidad de Condiciones

- Temperaturas mínimas  $< -2^{\circ}\text{C}$
- Nivel de Saturación Alto (SA) o Bajo (SB)
- Presencia de Nieve (N) por uso de sales.

Dr.-Ing. Luis Ebersperger M.





# ***La Práctica***

# Requisitos al Hormigón

---

De acuerdo al Estado del Arte estos requisitos incluyen el cumplimiento de:

- 1) uso de áridos resistentes al hielo/deshielo
- 2) obtención de un hormigón impermeable
- 3) contenido mínimo de poros (aire incorporado)

En algunos casos además se exige :

- 4) el contenido de microporos de aire
- 5) factor de espaciamiento entre ellos.

# Requisitos al Hormigón

---

## 1) Áridos resistentes al hielo/deshielo

- La **NCh163:2013** especifica el ensayo de desintegración por sulfatos según **NCh1328:1977**, que determina la viabilidad de las partículas de áridos para ser utilizadas en ambientes de clima frío.
- De acuerdo al tipo de sulfato utilizado,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  o  $\text{MgSO}_4$ , se define un 10% o 15% máximo de pérdida de masa respectivamente, tanto para el árido grueso o fino.
- Las muestras son inmersas en soluciones con sulfato a  $20\pm 2^\circ\text{C}$  durante  $17\pm 1\text{h}$  y luego secadas a  $110\pm 5^\circ\text{C}$  hasta masa constante y enfriadas a temperatura ambiente ( $\sim 24\text{h}$ ). Este ciclo de inmersión y secado se repite **5 veces**.
- Finalmente se determina la suma de las pérdidas de masa de cada fracción.

# Requisitos al Hormigón

---

## 2) Obtención de un hormigón impermeable

- A través de una adecuada dosificación se debe buscar la obtención de una mezcla densa e impermeable. De este modo se reduce la porosidad de la mezcla conjuntamente y la presencia de capilares que permiten el ingreso de agua hacia el interior.
- Para ello se define en forma **Prescriptiva** el cumplimiento de:
  - una resistencia mínima a la compresión
  - un contenido mínimo de cemento, y
  - una razón a/c máxima.

# Requisitos al Hormigón

## 3. La Práctica

### 2) Obtención de un hormigón impermeable

- Determinar la permeabilidad del hormigón por **Desempeño**

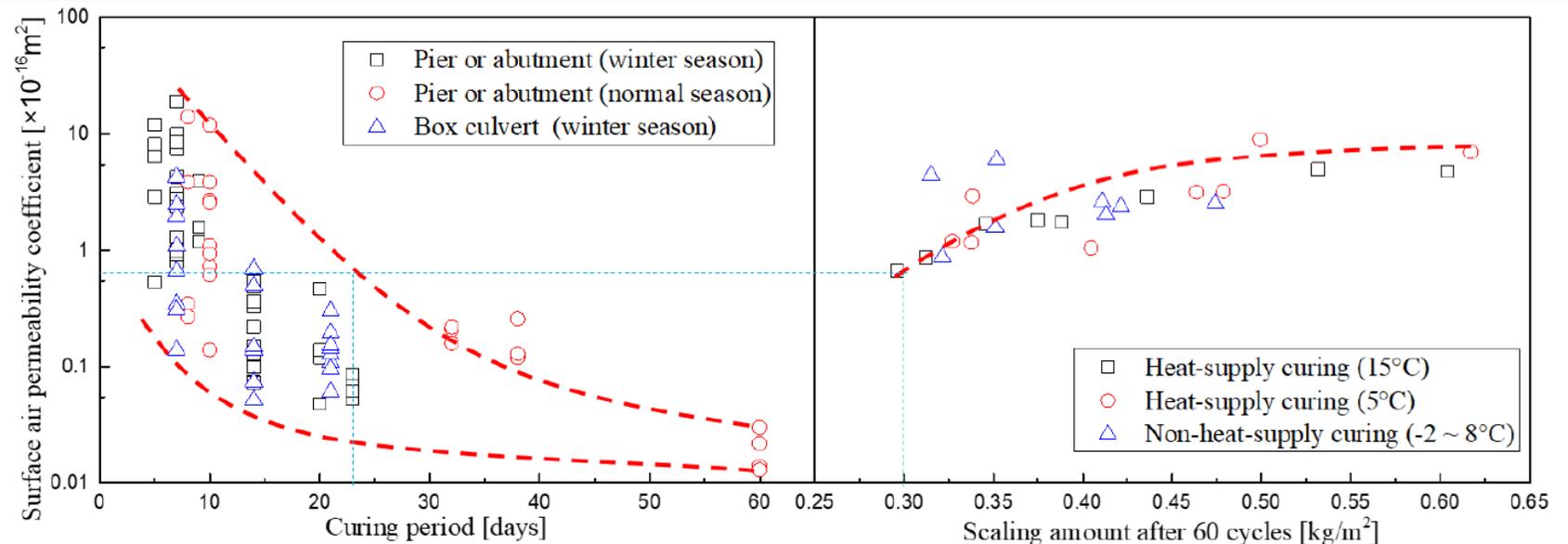


Fig. 7 – The relationship between curing period and the scaling amount after 60 cycles of freezing-thawing action

Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

\* Para obtener un hormigón resistente a ciclos de H/D la Permeabilidad al Aire  $< 1,0 \times 10^{-16} \text{m}^2$  o el período de curado inicial alargarse a lo menos 3 semanas.

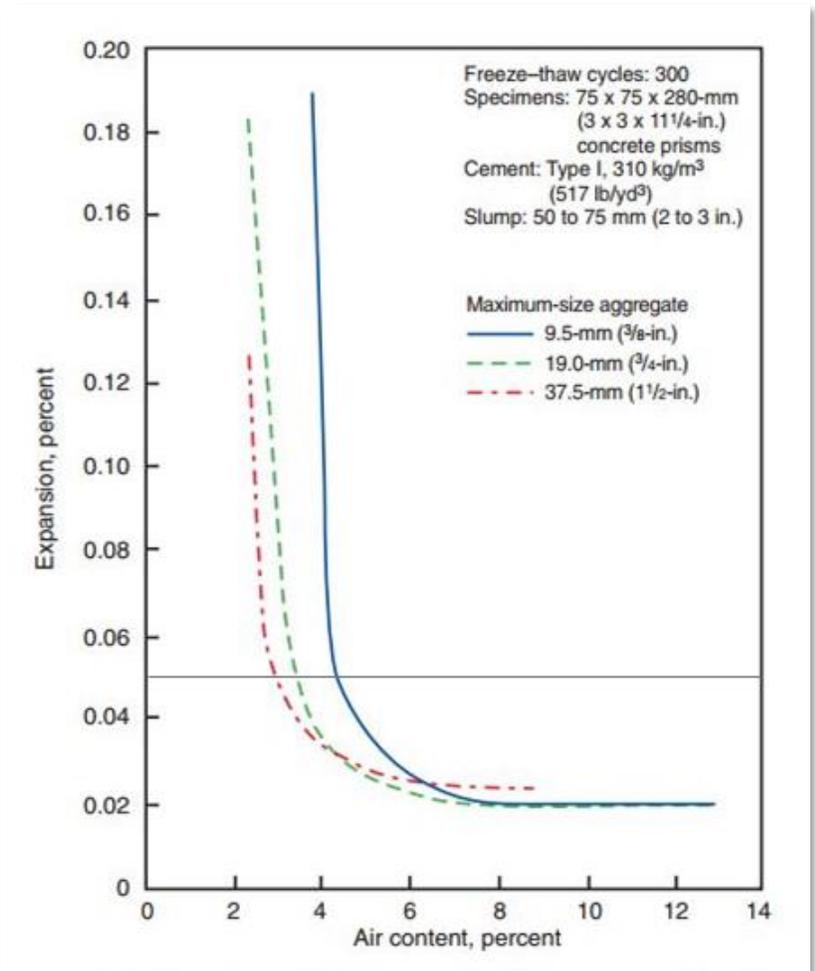
- Meng Zhang, Yuki Sakoi, Minoru Aba, and Yoichi Tsukinaga: "Effect of initial curing conditions on air permeability and de-icing salt scaling resistance of surface concrete", Journal of Assian Concrete Federation, Vol. 5, No.1,(2019)

# Requisitos al Hormigón

## 3. La Práctica

### 3) Contenido mínimo de aire incorporado

- Los poros incorporados a través del uso de un **aditivo incorporador de aire** pueden recibir el agua congelada y entregarla nuevamente durante la descongelación, si éstos se encuentran en la cantidad requerida y lo suficientemente cercanos entre ellos.
- Su efecto de reducción de la expansión, que experimenta una probeta después de 300 ciclos de hielo/deshielo, depende del tamaño máximo del árido utilizado:



A mayor tamaño agregado, menor contenido de aire es requerido.

# Fabricación del hormigón

---

- Verificación de cumplimiento de requisitos de materiales constituyentes, en especial **agregados**.
- Realización de **hormigones de prueba** que confirmen bajos niveles de impermeabilidad, capacidad resistente a los ciclos, etc.
- Asegurar obtención de cantidad suficiente de **poros incorporados**.
- Asegurar la **tolerancia** del uso de adiciones, aditivos en relación a los ciclos hielo/deshielo.
- Considerar medidas complementarias, como la incorporación de aditivos o hidrorrepelentes que **dificulten el ingreso** de humedad/agua al hormigón.

# Aspectos constructivos

---

En el hormigón fresco, debe considerarse:

- reducir la permeabilidad
  - realizar un **vibrado** adecuado.
  - obtención de un **hormigón superficial** adecuado.
  - **curado** prolongado.

En el hormigón ya colocado, debe considerarse:

- reducir la saturación
  - planificar un **drenaje suficiente** en caso de lluvias para evitar alta saturación.
  - considerar medidas complementarias, como la impregnación, o colocación de **sellos superficiales** que dificulten el ingreso de humedad/agua al hormigón.
  - Correcta aplicación del **sellado de las juntas**.

# Aspectos constructivos

En el hormigón fresco, debe considerarse:

- evitar hormigonar en períodos fríos, en caso contrario:
  - instalar una **aislación** adecuada para evitar temperaturas  $< 5^{\circ}\text{C}$  y/o la congelación **durante el período inicial de endurecimiento**, en que el hormigón se encuentra con su proceso de hidratación en desarrollo.
  - **Calentar** mediante la creación de un microclima el hormigón.
- Para hormigón expuesto a ciclos de hielo/deshielo mientras se encuentra críticamente saturado, es necesario que se desarrolle una **resistencia mínima de compresión** previo a la exposición a la congelación. Esta resistencia debe ser  $\geq 28 \text{ MPa}$  (\*).
- En el caso de una Exposición Severa Grado **F3** la resistencia requerida es  $f'c = 35 \text{ MPa}$ , siendo la resistencia objetivo para efectuar el desmolde y descimbre de  $f'c = 26,5 \text{ MPa}$  ( $0,75 \cdot f'c$ )

\* ASTM C457-16 – Apéndice X1

# Aspectos constructivos

3.

La Práctica



Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

Ejemplo de losa de hormigón hormigonada en invierno

- Proyecto de ENAP de construcción de estructuras de ánodos que serán sumergidas a -70m en el fondo del Estrecho de Magallanes.
- Como contrapeso contemplan una losa de hormigón armado.

Condiciones constructivas y operativas:

- Confección durante el invierno – **Clima Frío**
- Estructuras sumergidas bajo agua – **Ambiente agresivo marítimo**
- Operación – sumergida en **ausencia de ciclos hielo/deshielo**

Condiciones de Diseño:

- **Vida Útil** mínima de 20 años para ambiente marítimo.
- Ejecución de **proceso de optimización** de mezclas en laboratorio (adiciones de **Alto Desempeño** junto a **Ensayos de Desempeño**).

# Aspectos constructivos

3.

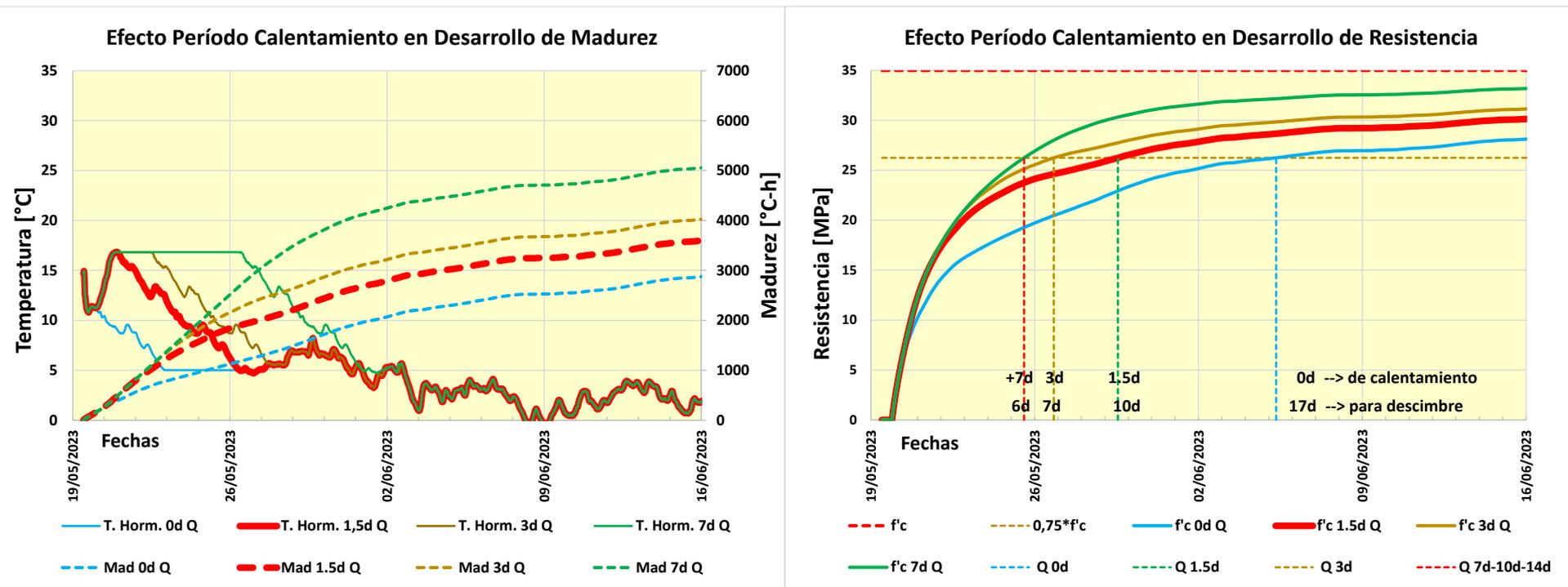
La Práctica



Dr.-Ing. Luis Ebensperger M.

Ejemplo de losa de hormigón hormigonada en invierno

- Medición y simulación por **Madurez** del efecto de calentar el ambiente.



- **Recomendación:** todas las obras de hormigón debiesen ser controladas durante el período invernal mediante Madurez, con una frecuencia según la importancia de la obra.

# Proceso constructivo de pavimentos

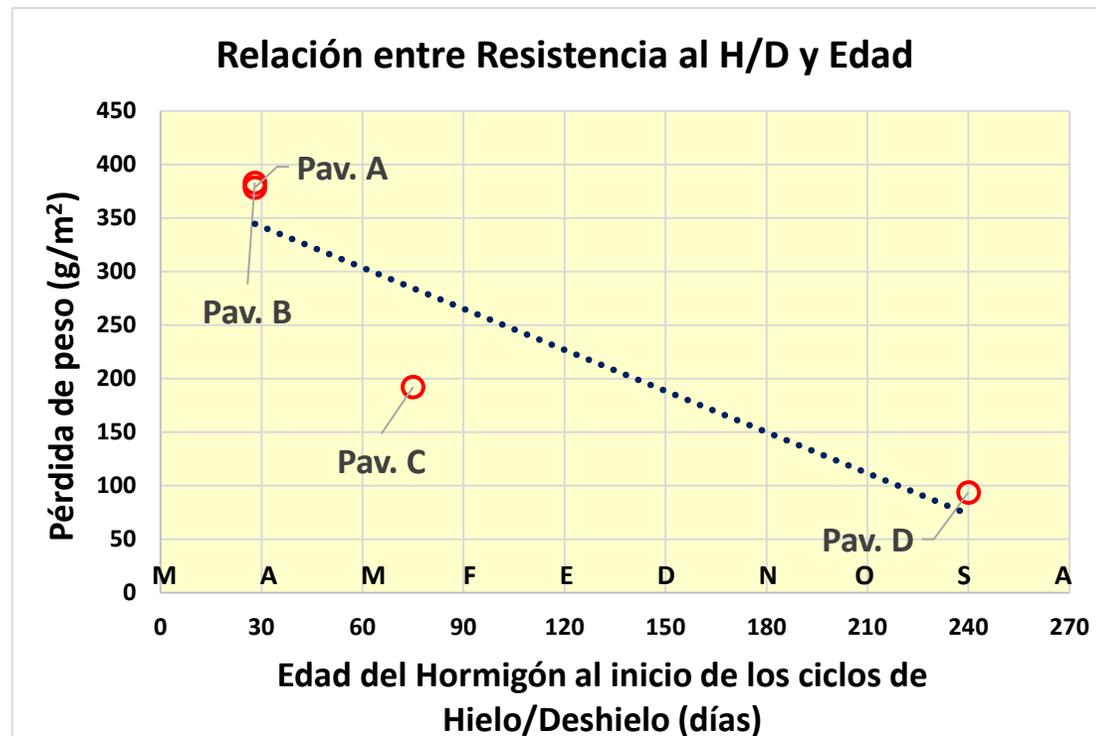
## 3. La Práctica



Dr.-Ing. Luis  
Ebensperger M.

**Efecto de la Edad del Hormigón:** ➤ PCA Portland Cement Association, "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", 1era. Edición, 2004.

- "El hormigón colocado durante la primavera o el verano tiene **un período de secado adecuado**. Sin embargo, el hormigón colocado en el otoño normalmente no se seca suficientemente antes que se usen los descongelantes..."



➤ Estudio realizado en hormigones de 20 años de edad.

## Mensaje Final

---

***¡ Es el momento de realizar investigación aplicada en la zona !***

***“Centro de Excelencia en Clima Frío de Chile”***

***Implementación de un Laboratorio de Durabilidad de Materiales de Construcción en Clima Frío de Magallanes***



***Gracias***