



**Mejores Prácticas para el Proyecto
y Ejecución de Pavimentos de Hormigón**

Propiedades y durabilidad de los hormigones

Dirección Nacional de Vialidad
Distrito 9° | San Juan
San Juan
10 y 11 de Agosto de 2016



Estado fresco y endurecido

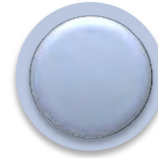
Hormigón: 2 Estados

- **2 estados** con propiedades y particularidades específicas
- **1 período** de “transición”



FRESCO

Uniformidad
Trabajabilidad
Segregación
Fraguado
Cohesión
Exudación



ENDURECIDO

Resistencia y rigidez
Estabilidad
dimensional
Durabilidad
Economía



Trabajabilidad

Facilidad con que el hormigón puede ser **mezclado, transportado, colocado y compactado** con los medios disponibles en obra.

- **No depende exclusivamente de las características del hormigón**
(Ver: equipamiento de mezclado y transporte, los métodos de colocación y compactación a utilizar, terminación)
- **Influenciada por** el clima, distancias de transporte, tiempo y forma de descarga
- **Medimos la consistencia como parámetro indirecto**

Cohesión

Aptitud para mantenerse como masa plástica, sin segregación

Depende de:

- contenido material fino (pasa 300 μm)
- la cantidad de agua
- el asentamiento
- aire intencionalmente incorporado

No hay un método cuantitativo para medir la segregación



Exudación

¿Deseable o contraproducente?

Tendencia a la segregación

- diferentes densidades
- Desbalance finos vs agua



Agua asciende
a la superficie



Exudación

VER:

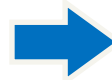
1. Planos de debilidad
2. Adherencia
3. Porosidad, resistencia al desgaste

- Aumento de la temperatura
- Aumento de la velocidad del viento
- Disminución de la humedad relativa



**Aumento de la velocidad de
evaporación**

Si la velocidad de Evaporación
> a la de Exudación

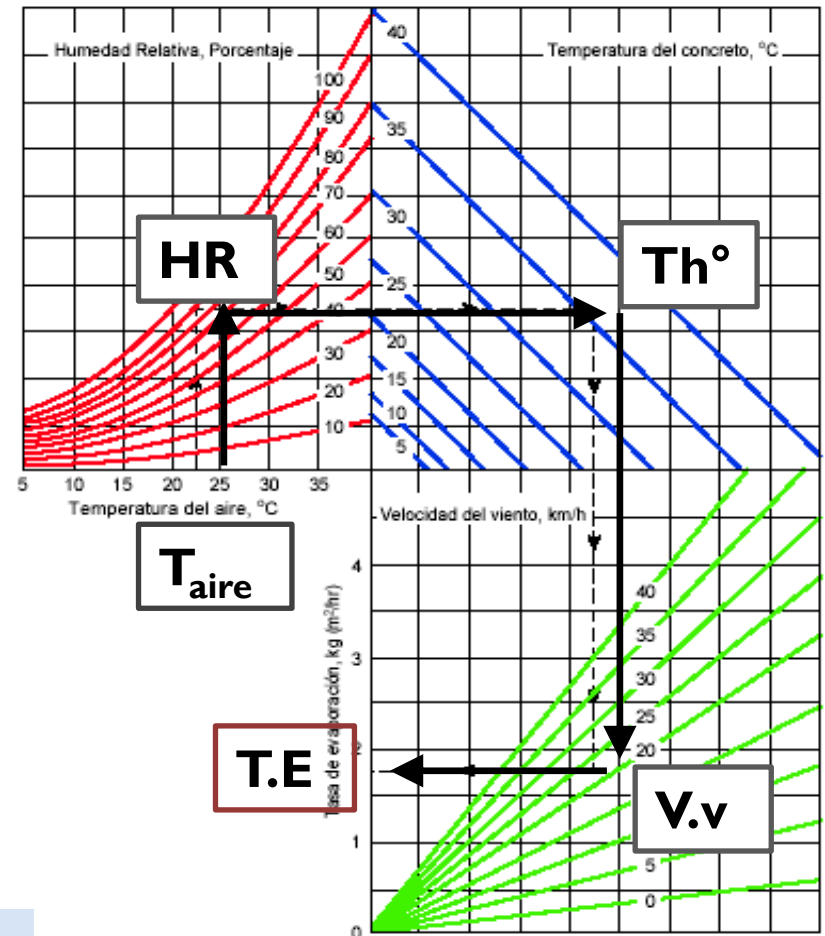


La superficie se **contrae y la restricción** de la parte interior del hormigón produce las fisuras plásticas



**Fisuras por
contracción
plástica**

¿Cómo reducir el riesgo de fisuración por contracción plástica?



Diseñar la mezcla para una velocidad de exudación mayor a la de evaporación

Exudación

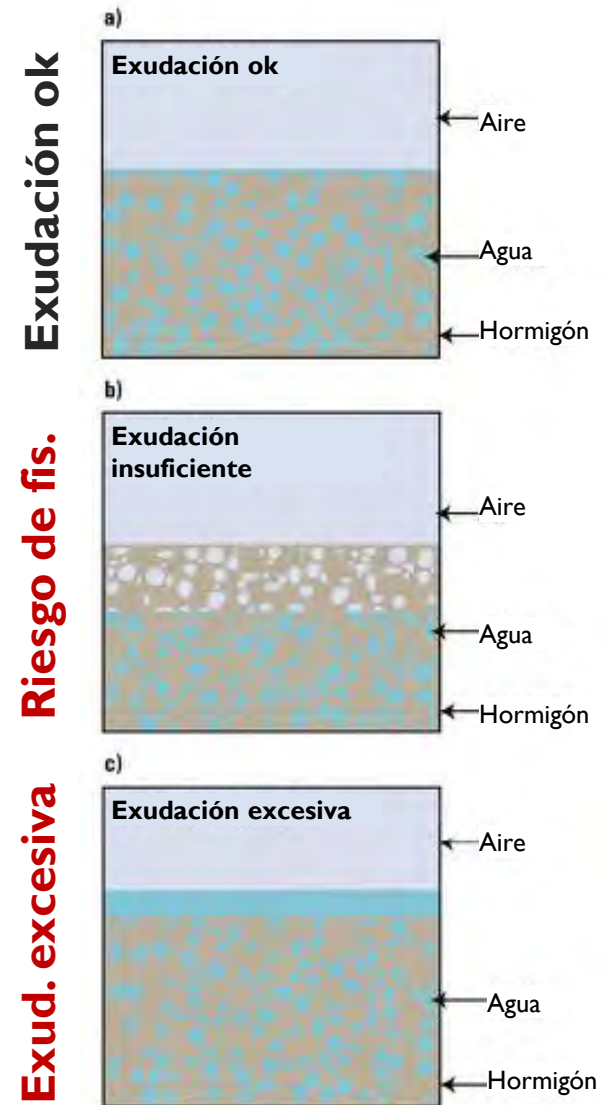
¿Cómo ajustarla?

Factores

- Finura del cemento
- Uso de adiciones minerales
- Relación agregado fino : grueso (Especialmente, fracción pasa tamiz 300 μm)
- Contenido de agua de amasado
- Uso de aditivos químicos
- Tiempo de fraguado de la mezcla de hormigón

Velocidad y capacidad de exudación: medir según **Norma IRAM 1604**. Medir en **laboratorio y en obra**

Cuidado con **Tasas de evaporación** > 0,25-0,50 kg/m²/h !!!

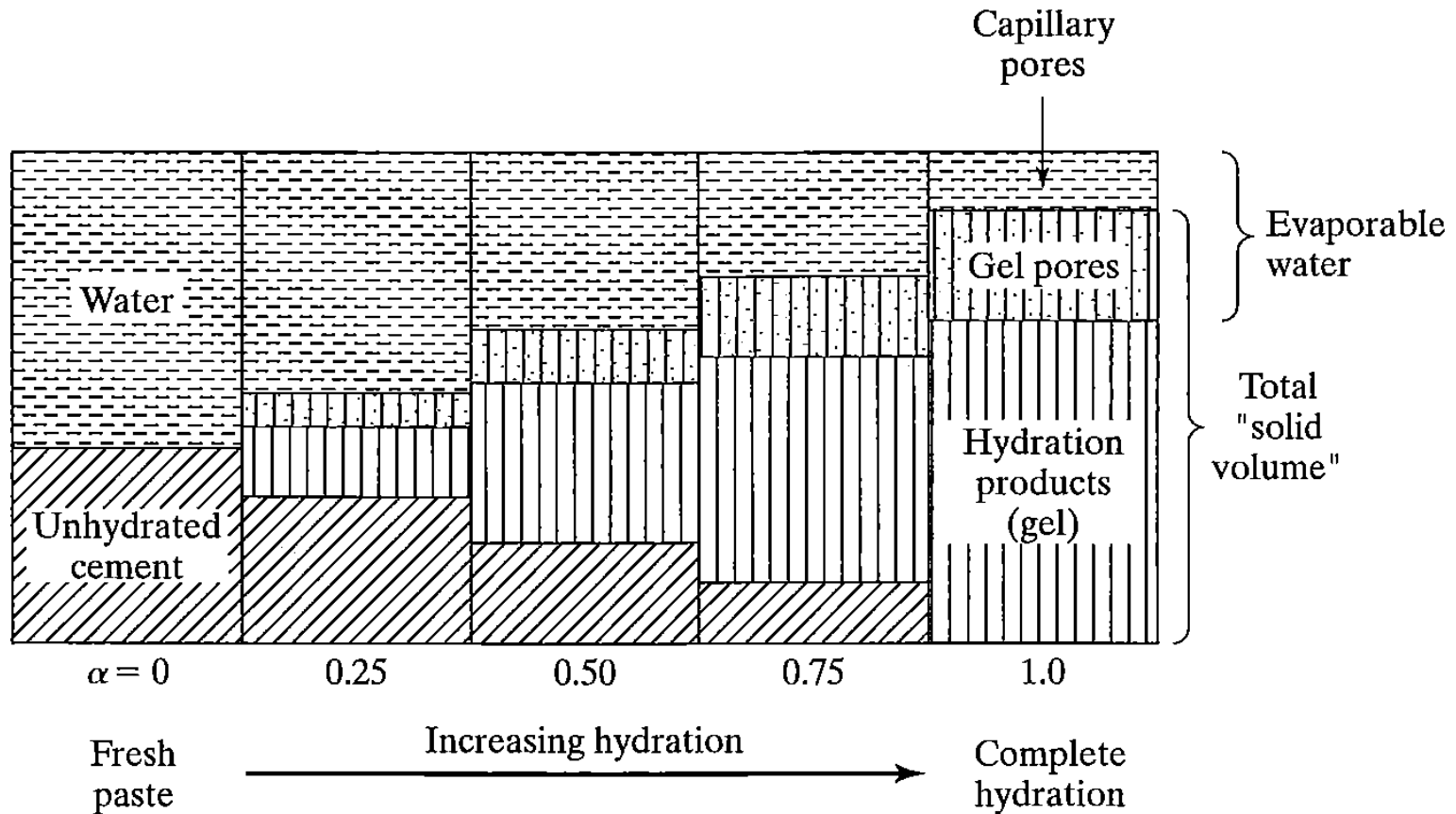


Hidratación, Fraguado, Endurecimiento



	ETAPA 1	ETAPA 2	ETAPA 3	ETAPA 4	ETAPA 5
Instancia y duración	MEZCLADO DEL HORMIGÓN Alrededor de 15 min	INDUCCIÓN (dormancy) De 2 a 4 h	ENDURECIMIENTO De 2 a 4 h	ENFRIAMIENTO	DENSIFICACIÓN Continúa por años
¿Qué pasa en el hormigón?	<ul style="list-style-type: none"> Generación de calor. Luego, rápido enfriamiento 	<ul style="list-style-type: none"> Estado plástico de la mezcla Trabajable Sin liberación significativa de calor 	<ul style="list-style-type: none"> Liberación de calor Inicio de endurecimiento Ganancia de resistencia Desarrollo de tensiones 	<ul style="list-style-type: none"> Tensiones pueden superar la capacidad resistente (si no son liberadas) 	<ul style="list-style-type: none"> Ganancia de mayor resistencia Reducción de la permeabilidad
¿Qué debe hacer el constructor?	<ul style="list-style-type: none"> Asegurar correcta homogenización de la mezcla 	<ul style="list-style-type: none"> Transporte Colocación Compactación y terminación del hormigón (Antes del TIF) 	<ul style="list-style-type: none"> Curar el hormigón tan pronto como sea posible Aplicar compuestos líquidos formadores de membranas de curado 	<ul style="list-style-type: none"> Aserrar juntas para liberar tensiones en el hormigón 	<ul style="list-style-type: none"> Proteger al hormigón si se prevé descenso térmico significativo Prolongar el curado lo más posible

Grado de hidratación

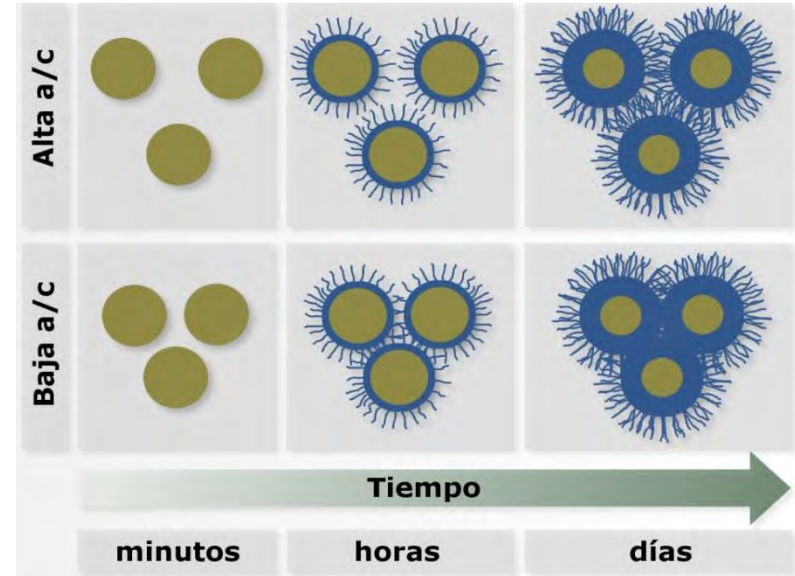
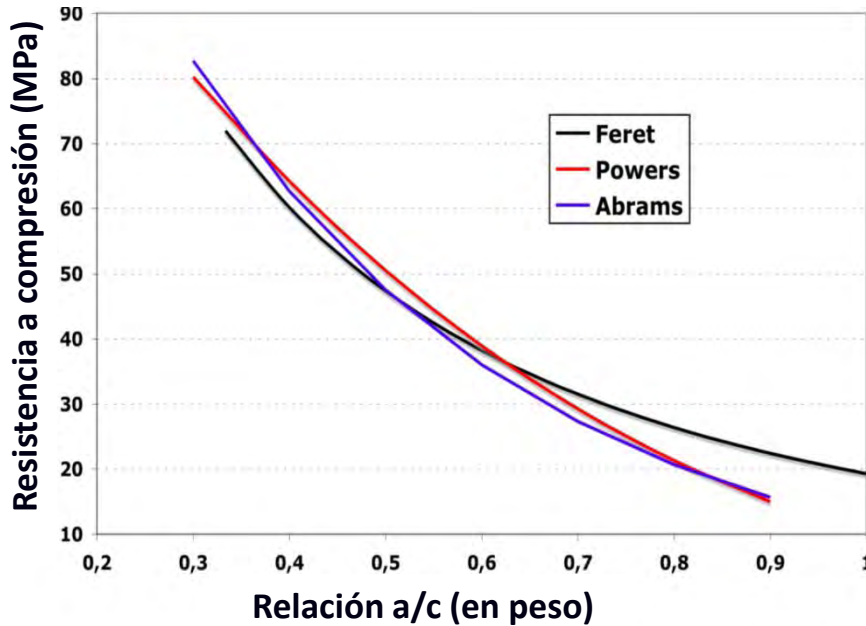


El volumen de sólidos crece más de 2 veces, pero el volumen total decrece porque el agua tiene un volumen específico menor cuando está combinada químicamente

Fuente: Mindess

Hidratación y desarrollo de resistencia

Relación agua / cemento

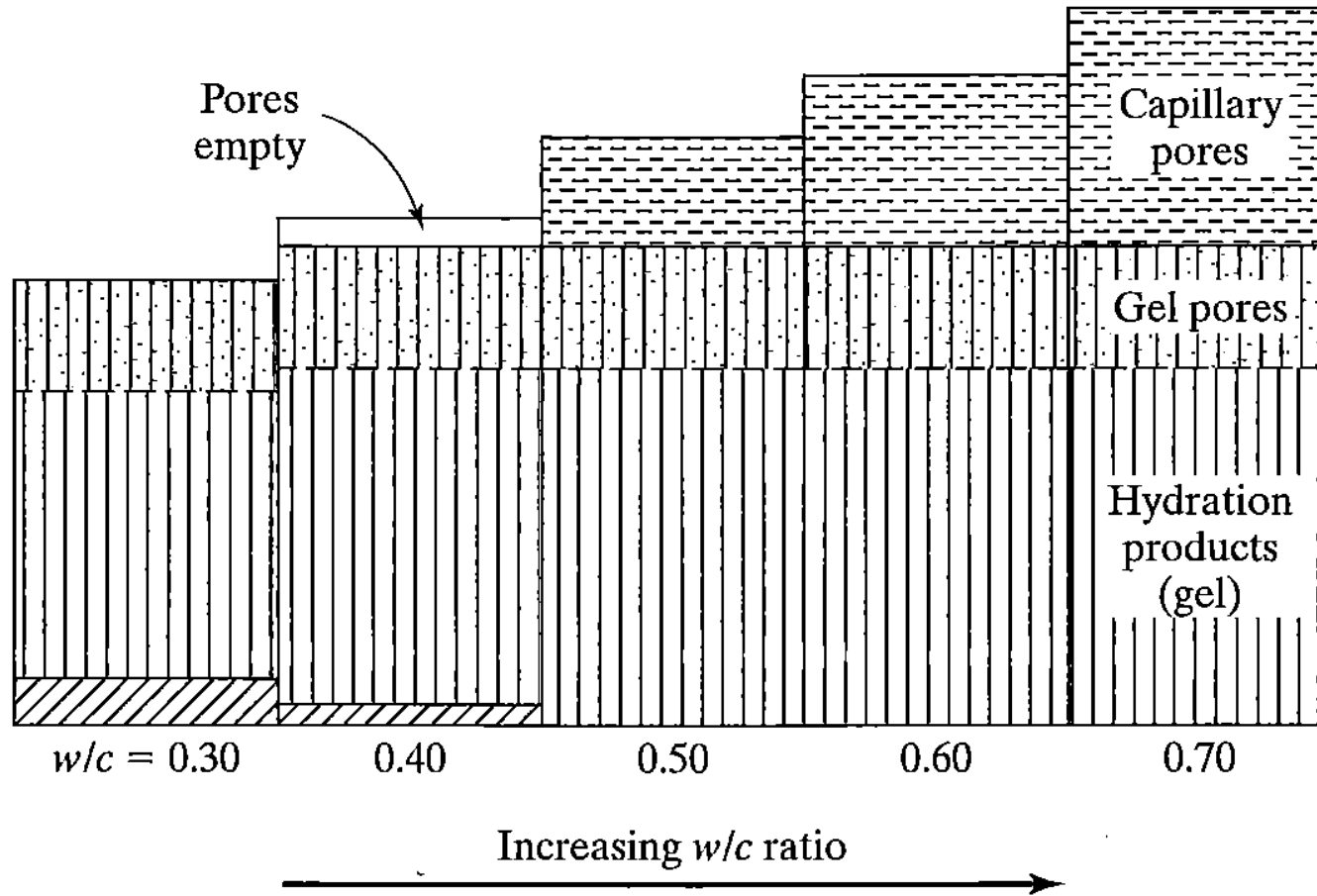


Otros factores que intervienen en las **propiedades resistentes y su evolución**:

- Resistencia intrínseca del cemento
- Cantidad de aire incorporado
- Velocidad de reacción (hidratación)
- Fase agregado: resistencia, TM
- Interfase: textura del AG, TM, a/c, composición del cto, polvo en AG
- Curado

Porosidad

Influencia de la relación a/c



Fuente: Mindess

Porosidad

■ Poros de gel

- Sus tamaños son de entre 0,5 a 10 nm
- Representa un volumen equivalente al 26% / 28% de los productos de reacción (S-C-H)

■ Poros capilares

- Sus tamaños son de entre 10 nm y 10 μ m
- Su volumen es variable, con formas tamaños y distribución “al azar”
- Su volumen es mayor, cuanto mayor es la a/c, menor el grado de hidratación y la compactación de la pasta
- Alta influencia en la permeabilidad de la pasta

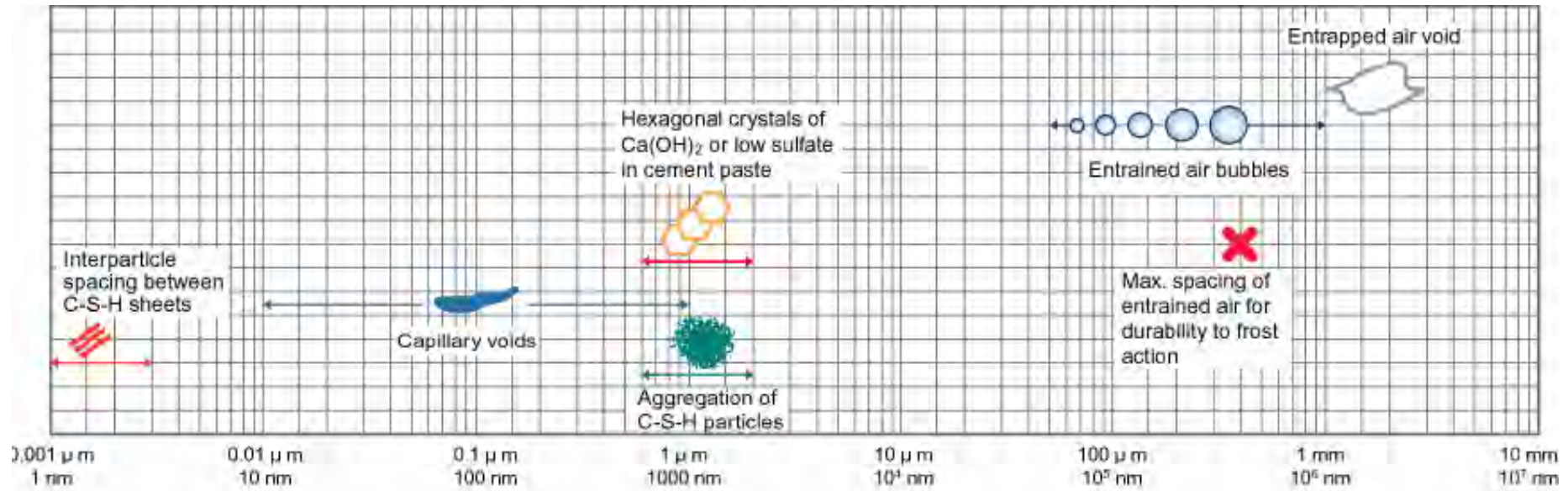
■ Macroporos de aire incorporado

- Son de tipo natural o intencionalmente incorporados
- Su tamaño puede ser del orden de 0,1 mm a varios mm
- Afectan significativamente la resistencia y durabilidad

Porosidad

- Cuando **a/c es muy baja**, parte del cemento no alcanza a hidratarse
- El **agua que se adiciona en una mezcla** es usualmente mayor que la que se precisa para la hidratación. El **agua no combinada permanece en los poros de gel, adsorbida superficialmente, o los poros capilares**
- El agua adsorbida y en los poros de gel influye en los fenómenos de contracción por secado y en el creep
- El agua en los poros capilares no participa significativamente en los cambios volumétricos

Porosidad

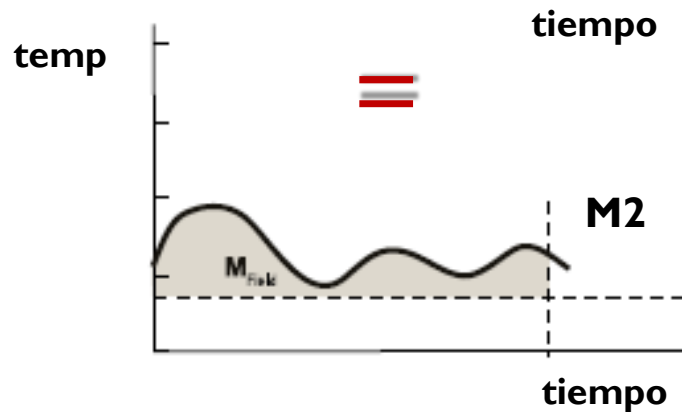
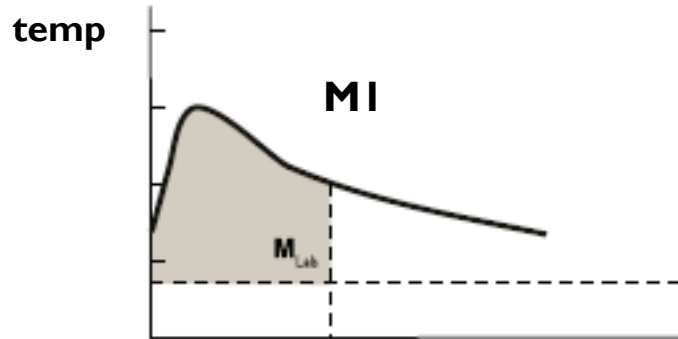


Dimensional range of solid and pores in a hydrated cement paste.

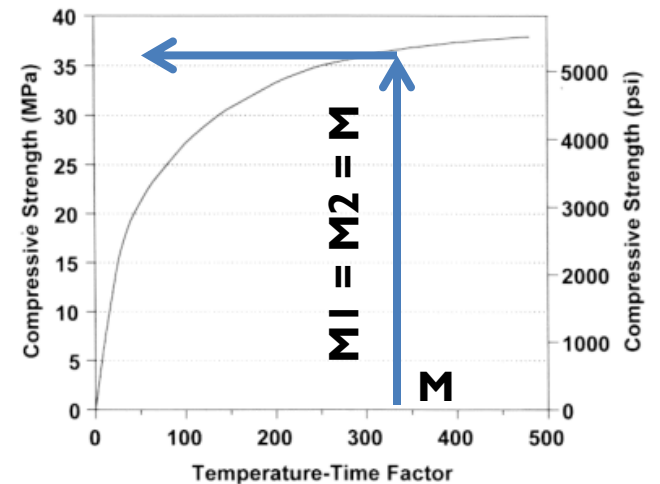
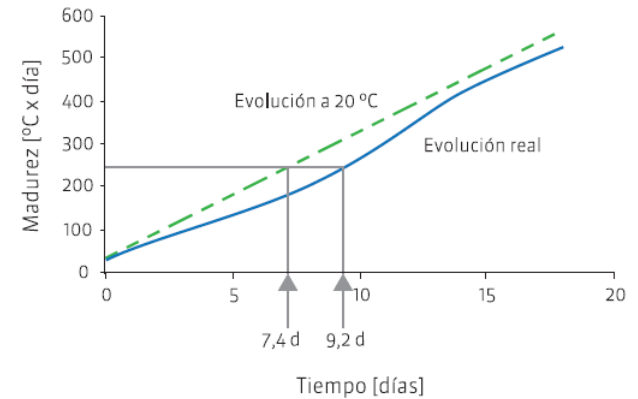
Mehta, Monteiro

Madurez

Influencia tiempo-temperatura

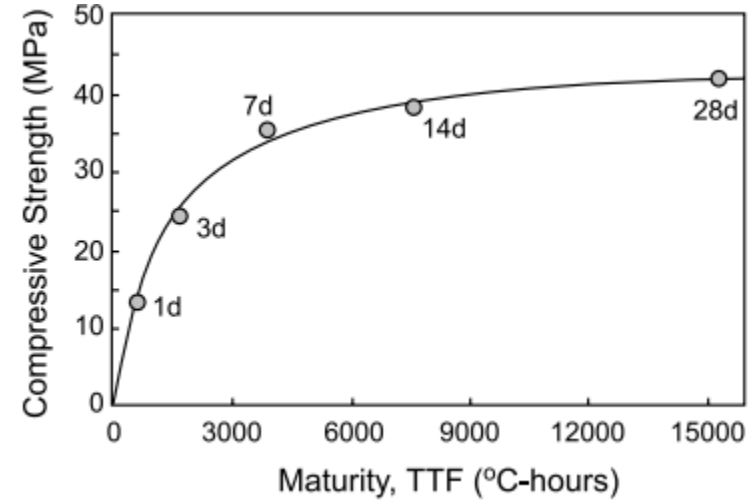
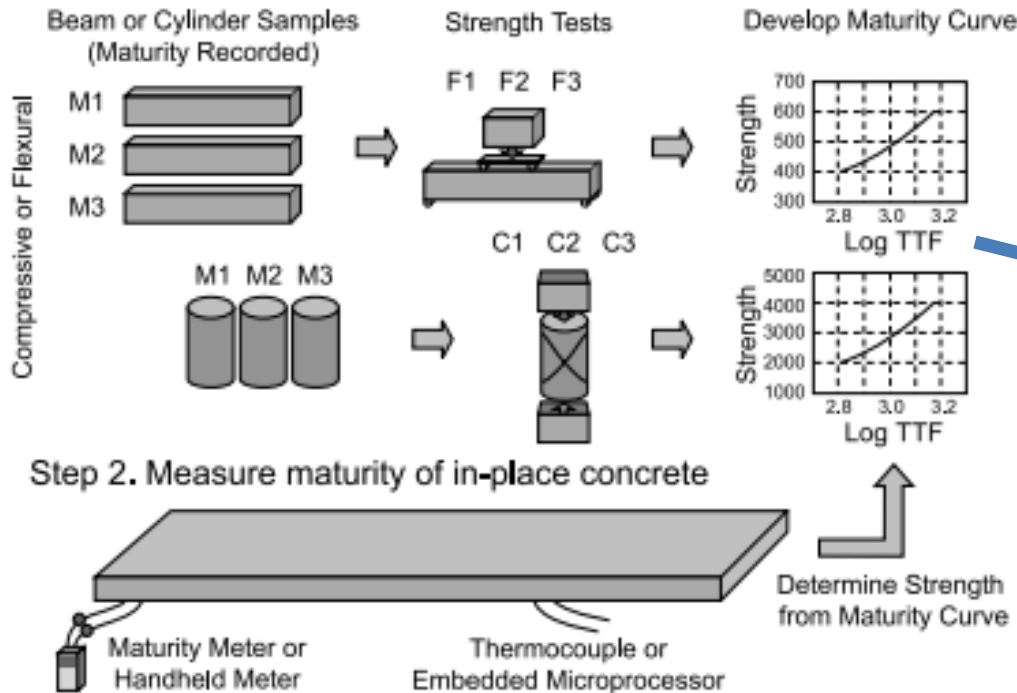


$$M = \sum [(T + 10)] \cdot tiempo$$



Madurez

Influencia tiempo-temperatura



CTPT

Resistencia mecánica

Compresión, flexión, desgaste

- La resistencia mecánica es un parámetro importante ya que, junto con el espesor, **define la capacidad portante del pavimento.**
- Depende de **distintos factores**, tales como: la relación a/c, del conjunto de materiales, de la compactación, del curado, y está influenciada por la calidad de los ensayos.
- **Módulo de elasticidad del hormigón:**

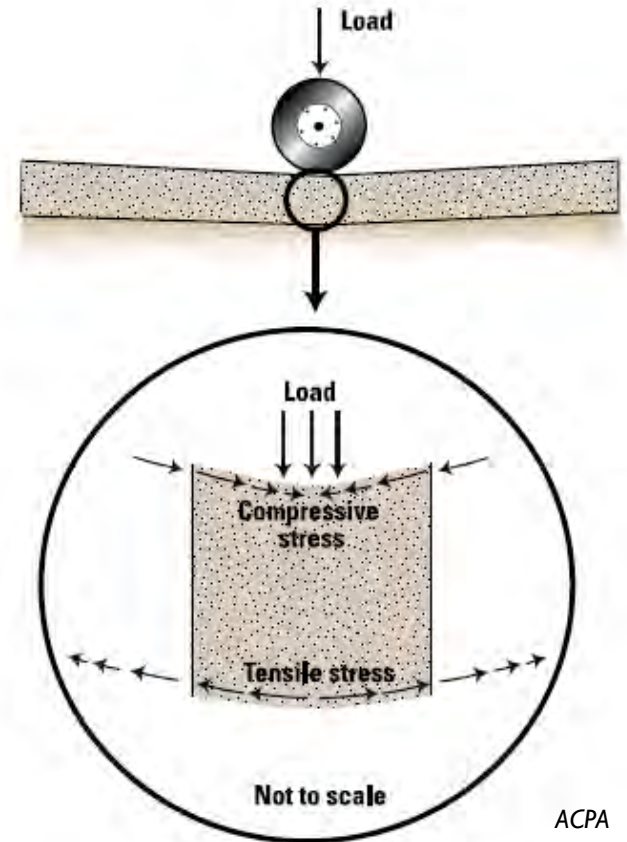
Alta rigidez



Menor deformabilidad

Baja rigidez

Riesgo de fisuración



Curado del hormigón

Importancia en el caso de los pavimentos

Todos los hormigones deben curarse

Cuanto más temprano, mejor!!

- **Prevenir fisuración plástica**
- **Contribuir con una rápida maduración** (capacidad resistente, tendencia a la fisuración temprana, resistencia al desgaste)
- Prevenir alabeo de losas por gradientes térmicos y humedad
- Evitar el secado prematuro
- Favorece el desarrollo de las reacciones de **hidratación** del material cementicio

Prolongar el curado

Usar métodos EFICIENTES y acordes con procesos constructivos

Compuestos líquidos formadores de membranas de curado

Capacidad para formar una película “impermeable” al vapor de agua

Emulsiones acuosas Parafina | Acrílicas | Resinas | Ceras

Disoluciones en solventes especiales o compuestos clorados Resinas



- No deben reaccionar desfavorablemente con el hormigón
- Pueden aplicarse por pulverizado manual o mecanizado
- Temprana aplicación

Compuestos líquidos formadores de membranas de curado

- **Capacidad de retención de agua (IRAM 1673):** parámetro más importante para evaluar el desempeño
- **Pigmentado con color blanco**
- **Validar su efectividad en campo**
- **Ver** compatibilidad con temperaturas de trabajo
- **Aplicación homogénea** y en **dosis** adecuadas (de 200 a 300 g/m²)
- **Prehomogeneizar la carga** antes de la aplicación (especialmente, los de base acuosa)
- **Acotar y controlar el tiempo de acopio**
- **VOCs**

Cambios de volumen

Contracción intrínseca en la pasta de cemento



Cemento no
hidratado
+
agua

AL
MOMENTO
DE SU
COLADO

TH - FIUBA

- No se puede evitar, pero sí controlar
- En algunos casos, su incidencia relativa es \ll que otras fuentes de variación dimensional

¿Cómo minimizarla?

- **a/c**: no menor a 0,40
- Minimizar **CUC**
- Menos **Vol de pasta** y más **Vol de AG**
- **Buen Curado**
- Usar cementos con menor velocidad de reacción (menor finura, menor SC_3, AC_3 y mayor SC_2)
- Minimizar el **uso de aditivos reductores de agua**

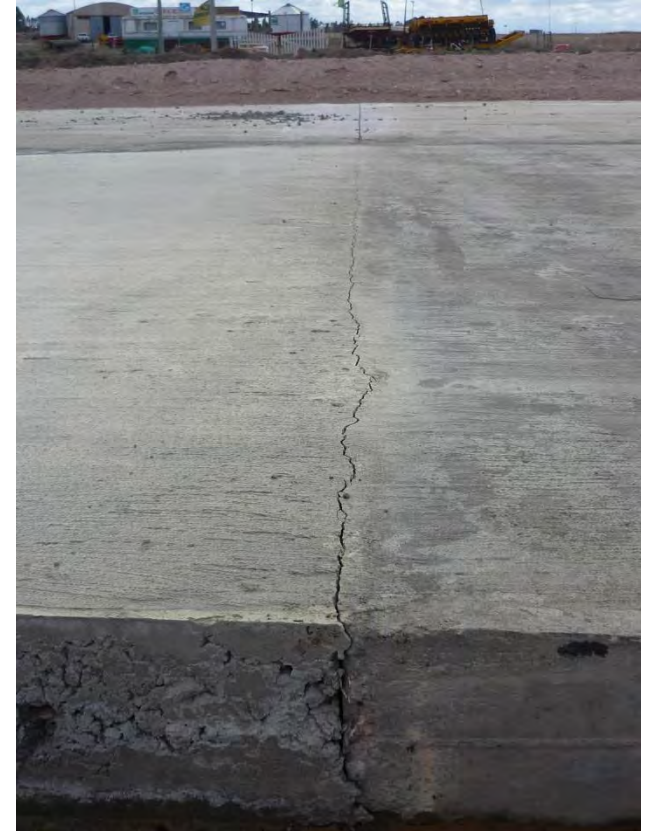
Cambios de volumen

Contracción por secado

Pérdida del agua, especialmente de poros de gel

Relevante en pavimentos, por su geometría

- Contenido de agua y a/c
- Finura y composición del cemento
- Tipo, contenido y granulom del agr.
- Rigidez de los agregados
- Tiempo
- Curado
- Adiciones



Cambios de volumen

Contracción térmica



SITUACION DIURNA
(con asoleamiento)

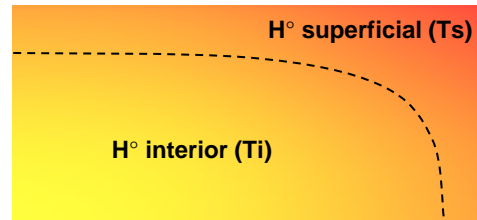


SITUACION NOCTURNA
(o sin asoleamiento)

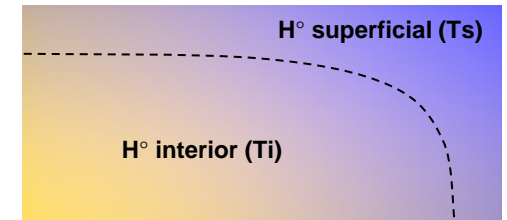
Cambio volumétrico

ΔT

CET_{h°



$T_s > T_i$



$T_i > T_s$

- **Marcas de origen térmico, por gradientes:**
 - Día:** Asoleamiento + calor de hidratación
 - Noche:** Brusco enfriamiento del hormigón en la noche
- **Hormigón superficial** tiene mayor madurez, mayor módulo de elasticidad y menor extensibilidad

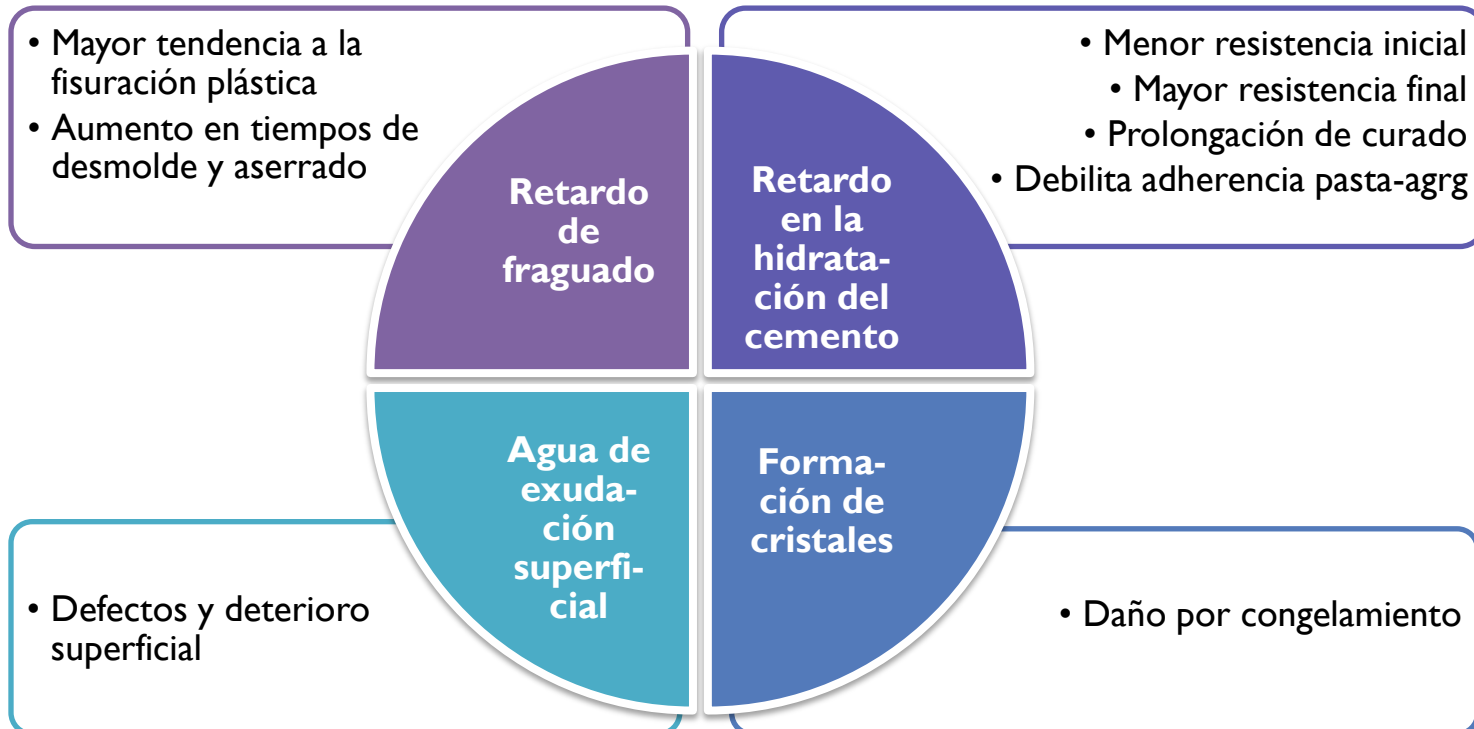


Hormigón fresco

¿Qué efectos produce la exposición a clima frío?

Reglamento **CIRSOC 201**

- ▶ Temperatura media diaria $< 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 días consecutivos
- ▶ Temperatura ambiental $\leq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, durante medio día en 24 h



Trabajo en clima frío

Recomendaciones

- **Comenzar el trabajo con temperatura $> 2^{\circ}\text{C}$, en ascenso.**
- **Controlar la temperatura del hormigón fresco antes del colado. No colocarlo si $T < 16^{\circ}\text{C}$**
- **Detener el trabajo cuando la temperatura ambiente sea de 5°C en descenso.**
- **La aplicación de compuestos formadores de membranas de curado (resina) contribuyen a conservar temperatura del HF**
- **Proteger al hormigón utilizando films plásticos, mantas o protectores aislantes. Aprovechamiento del calor de hidratación.**



Hormigonado en tiempo caluroso

Generalidades

- Cualquier combinación de: **elevada temperatura ambiente, baja H.R. y viento**

Aceleración del fraguado

Evaporación rápida

Aceleración de las reacciones de hidratación

Mayor Gradiente Térmico durante las primeras horas



- Menor tiempo disponible para las ventanas de trabajabilidad y aserrado
 - Riesgo de juntas frías
- Mayor tendencia a la fisuración plástica
 - Más demanda de agua
 - Mayor resistencia inicial
 - Menor resistencia final
- Mayor Riesgo de Fisuración Térmica

- Alta temperatura → menor As y resistencia a edad prolongada; mayor tendencia a la fisuración → **Control de la temperatura del hormigón fresco**
- ~ Cada 3 °C de aumento de temp en HF → + 2 dm³ agua /m³ h°

Hormigonado en tiempo caluroso

Recomendaciones

- Trabajar con la menor demanda de agua posible
- Diseñar la mezcla con el menor contenido de agregado fino posible para las condiciones de trabajabilidad y terminación establecidas
- Regar acopios de agregados para: reducir su temperatura, mantener los áridos gruesos saturados
- Regar la cancha previa colocación del hormigón
- Controlar la temperatura del hormigón en estado fresco
- Uso de hielo en caso de necesidad



Hormigones especiales para pavimentación

Hormigones para TAR

- Empleados en condiciones de alta productividad requerida
- Elevado consumo de materias primas, con alta uniformidad requerida
- Hormigones de consistencia seca ($A_s = 2-4$ cm)
- Contenidos moderados de material cementicio, con un ligero mayor contenido de agregados (y MF)
- Aprovechan alta densificación lograda por TAR
- Aptos para vías de todo tipo de tránsito

Hormigones Fast-Track

- Empleados especialmente en obras de reparación o cuando se requiere una muy rápida habilitación al tránsito en vías importantes (p.e. arterias urbanas principales)
- Alta resistencia inicial, a compresión y flexión
- Material cementicio: finura, composición
- Elevado CUC y baja a/c
- Curado y protección más intensiva
- Uso de acelerantes (fraguado y endurecimiento), y reductores de agua

Hormigones HCR

- Menor cantidad de pasta (~ 30 %), y de agua de mezclado (~ 40 %)
- Consistencia muy seca
- Propiedades mecánicas similares



HCR con TM = 19 mm



HCR con TM =9,5 mm

ERMCO

25 a 30 MPa a 5 días, a compresión

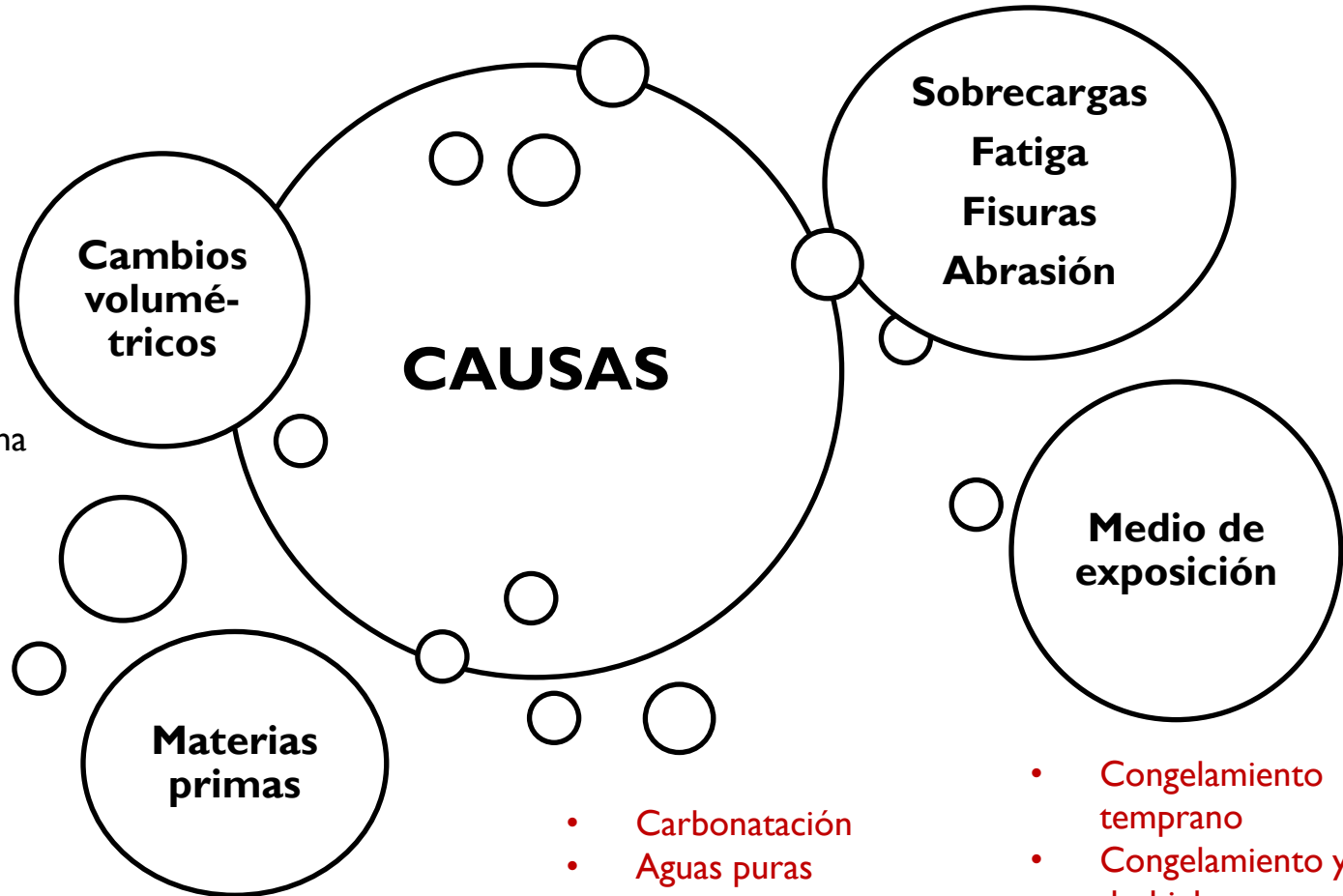
- Menor contracción por secado y tendencia a la fisuración
- ~ 85% del volumen ocupado por agregados
- No se aserran las juntas ni se colocan pasadores (Fisuras por contracción cada 9 a 30 m)
- No se emplean para vías de alta velocidad (> 45 km/h)

Durabilidad

Durabilidad

¿Por qué fallan los hormigones?

- Contracción por secado
- Contracción plástica
- Asentamiento plástico
- Contracción química / autógena
- Gradientes H % y T °C



- RAS
- Ataque por sulfatos (interno y externo)

- Carbonatación
- Aguas puras
- Cloruros
- Cristalización de sales
- descongelantes

- Congelamiento temprano
- Congelamiento y deshielo
- Manchas
- Corrosión del acero por CO₂ o por Cl⁻

Durabilidad

Congelamiento y deshielo

¿Qué sucede?

- **Agua + acción cíclica de congelamiento (temperatura de congelamiento) + sistema de poros**
- Grado de saturación de la pasta
- Factor de espaciamiento
- Temperatura interior
- Comportamiento cíclico (>200-300)
- Resistencia al congelamiento de agregados
- Fisuración por restricción a la expansión de agua congelada
- Usualmente, fisuración paralela a la superficie

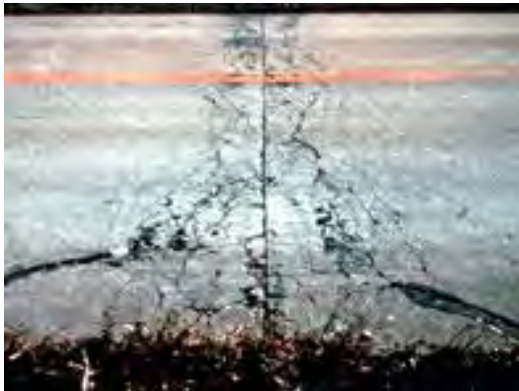
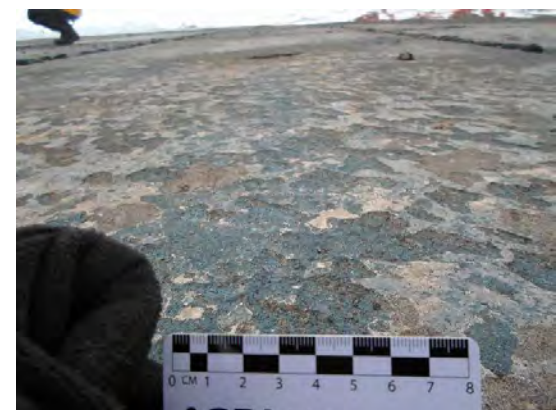
¿Cómo lo prevenimos?

- **Incorporación de aire intencional**
 - Tamaño uniforme: $50 \mu\text{m} < \varnothing < 1\text{mm}$
 - Factor de espaciamiento: $< 0,2 \text{ mm}$
 - Sin coalescencia
- **Calidad en la matriz cementicia (< permeabilidad)**



Durabilidad

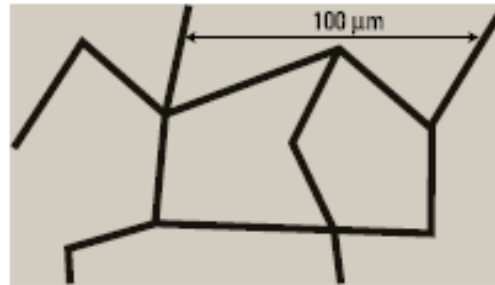
Sales descongelantes, descascaramiento superficial y D-Cracking



Durabilidad

Ciclos de congelamiento y deshielo

▶ Modelo



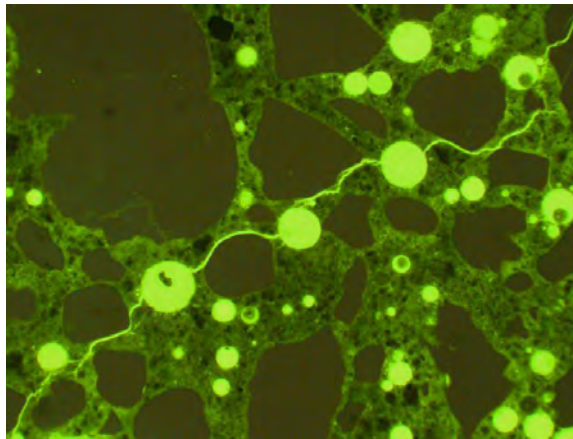
Sin A.I.I.



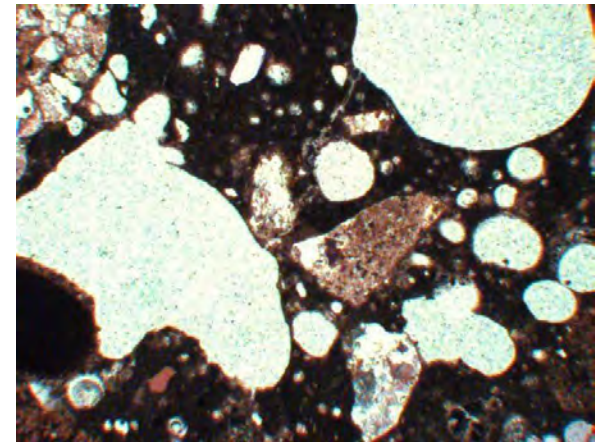
Con A.I.I.

CTL Group

▶ Fallas



- **Deficiente cantidad** de burbujas de aire incorporado
- **Fisura paralela** a la superficie expuesta del hormigón



- **Coalescencia** de burbujas de aire

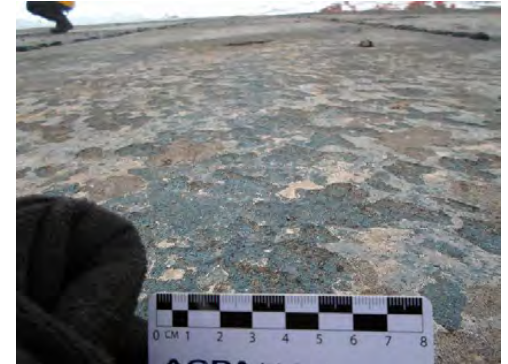
Durabilidad

¿Cómo mejorar la durabilidad a C-D?

- **Sistema de poros de aire:** espaciamiento, tamaño
Óptimo!... ~ 9% en el mortero; burbujas pequeñas y más cercanas → Ver tablas según TM
- **Aditivo Incorporador de Aire:** tipo y dosis
- **Agregados:** granulometría, resistencia a C-D
- **Contenido de pasta:** minimizar; **CUC mín (exp):** 340 kg/m³
- **Cementos:** con PPC altas y los de mayor finura, requieren mayores dosis de I.A.
- **Resistencia (f'c min) -CIRSOC-** 30 MPa (C1) o 35 MPa (C2)
- **Relación agua / cemento (a/c máx):** -CIRSOC-

0,45 (C1) – 0,40 (C2)

- Req reglamentarios para **penetración de agua a presión y succión capilar**

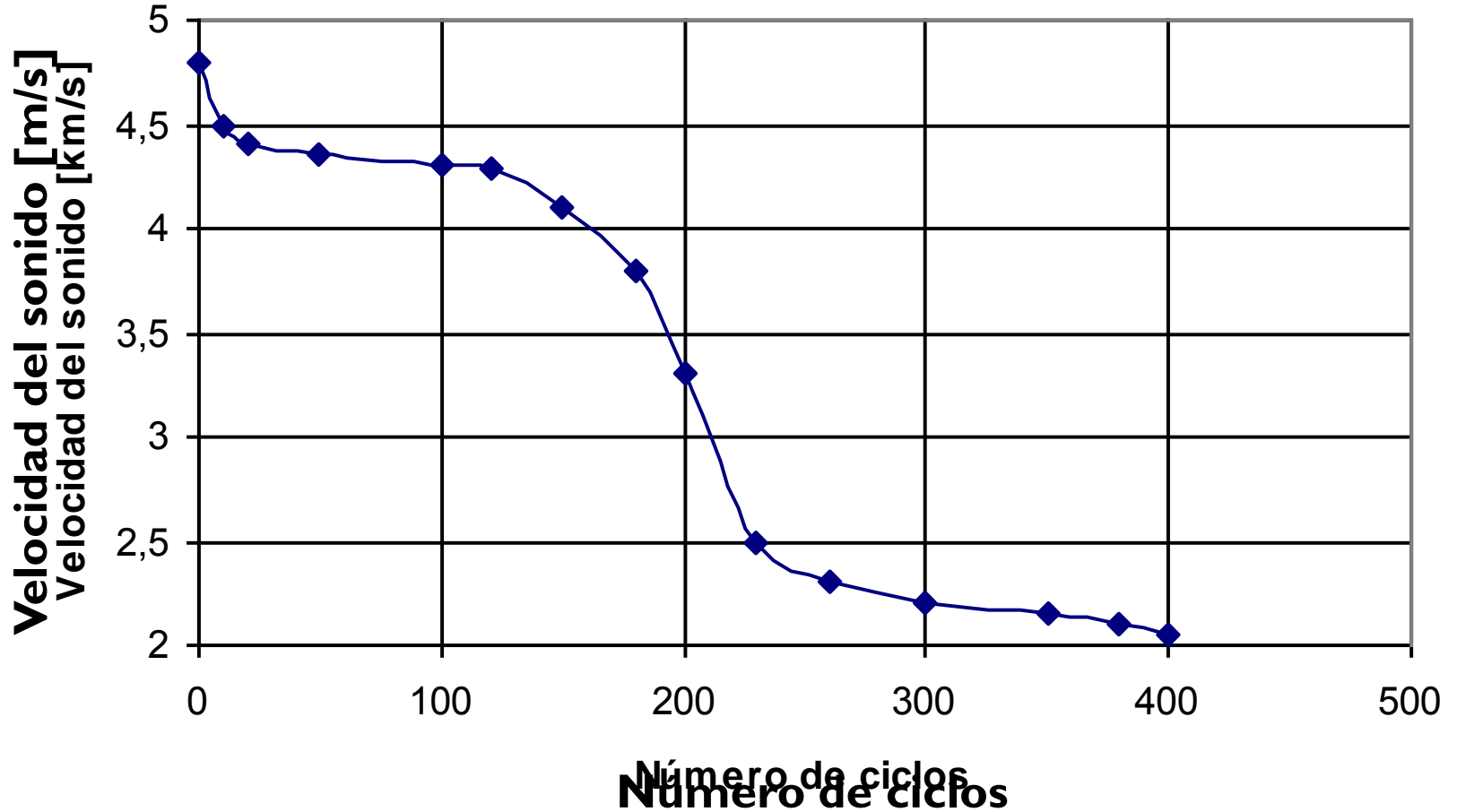


Tamaño máximo nominal del agregado grueso	Total de aire natural e intencionalmente incorporado al hormigón, de acuerdo con el tipo de exposición o para hormigones especiales (Capítulo 2, Tablas 2.5. y 2.7.)	
	Exposición tipo C1 y hormigón a colocar bajo agua	Exposición tipo C2
mm	% en volumen	% en volumen
13,2	5,5 ± 1,5	7,0 ± 1,5
19,0	5,0 ± 1,5	6,0 ± 1,5
26,5	4,5 ± 1,5	6,0 ± 1,5
37,5	4,5 ± 1,5	5,5 ± 1,5
53,0	4,0 ± 1,5	5,0 ± 1,5

Durabilidad

Ciclos de congelamiento y deshielo

Deterioro progresivo de un hormigón por ciclos de congelamiento-deshielo



Reacción álcali sílice

¿Qué sucede?

Reacción entre componentes alcalinos y minerales potencialmente reactivos en agregados silíceos

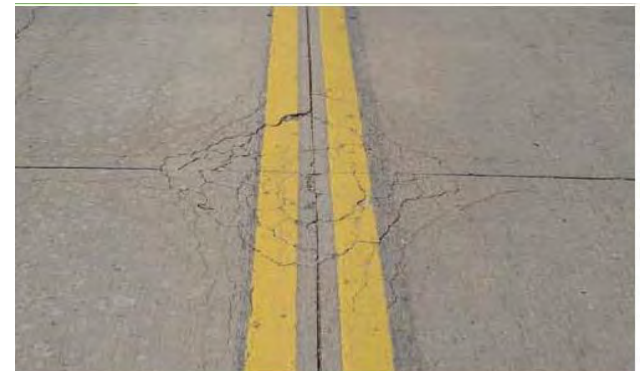
- **Agregados reactivos + álcalis + humedad**
- Compuestos silíceos amorfos
- Porosidad del agregado
- Álcalis en cantidad suficiente
- Permeabilidad de la pasta y la interfase
- Humedad (> 60%)
- Temperatura y tiempo

Producto de reacción: gel interior o en la periferia del agregado, absorbe agua y se expande

Típicamente, fisuración en forma de “mapeo”

¿Cómo lo prevenimos?

- Metodología de análisis previa, más:
 - ✓ Medidas **prescriptivas**, y/o
 - ✓ Medidas **prestacionales**



Reacción álcali sílice

Agregados potencialmente reactivos. Métodos

Método de ensayo	Aplicable para evaluar agregados			Edad de evaluación	Límite máximo de expansión (%)
	Afectados por	Potencialmente reactivos debido a la presencia de			
IRAM 1674	RAS	Ver excepciones		16 días	0,10
IRAM 1700	60 °C	RAS y/o RAC	Ópalo, calcedonia, vidrio volcánico, tridimita, cristobalita, dolomita (RAC)	13 semanas	0,04
			Cuarzo tensionado y/o microcristalino		0,08
	38 °C	RAS y/o RAC	Sin restricciones	52 semanas	0,04

IRAM 1531.2016

Cantos rodados silíceos del río Uruguay y agregados ígneos, metamórficos o sedimentarios (granitos, granodioritas, gneises, areniscas) que deben su reactividad al cuarzo tensionado deben ser evaluados mediante el ensayo de la IRAM 1700 (convencional o acelerado)

Reacción álcali sílice

Medidas preventivas

Prescriptivas

1. Cemento RRAA, s/ IRAM 5000I
2. Limitar contenido de álcalis en el hormigón según el nivel de prevención que corresponda
3. Cemento de uso general (s/ IRAM 50000) que contenga AMA en cantidad adecuada (tablas)
4. Hormigón que AMAs en cantidades que sean conformes con la IRAM 50000 y con los mínimos de tablas para prevenir RAS
5. Para el caso E (++severo), usar AMAs y hormigón con bajo contenido de álcalis

Prestacionales

(con evaluación previa documentada)

1. Cemento que cumpla la IRAM 50000 o IRAM 5000+50002 que haya demostrado comportamiento satisfactorio con los agregados en evaluación (experiencia previa docum)
2. Cemento + AMA que hayan demostrado tener un comportamiento efectivo para prevenir la RAS
3. Usar inhibidores químicos
4. Cambiar el agregado, parcial o totalmente, por otro agregado no reactivo

Evaluación de la efectividad inhibidora: con IRAM 1700 (<0,040% a 104 semanas –para los casos 1 a 3-, a 52 semanas para el caso 4)), o con IRAM 1674 (<0,10% a 16 d)

Reacción álcali sílice

Método del prisma de hormigón (IRAM 1700)



Reacción álcali sílice

Esquema de decisión IRAM 1531

0. Análisis del agregado

Grado de reactividad alcalina del agregado	Expansión del hormigón utilizando la metodología y técnica de la IRAM 1700 ¹⁾ (%)		Expansión del mortero a 16 días en el ensayo IRAM 1674 ²⁾ (%)
	A 52 semanas en el ensayo tradicional (38 °C)	A 13 semanas en el método acelerado (60 °C)	
No reactivo	Menor que 0,040	Menor que 0,04	Menor que 0,10
Moderadamente reactivo	De 0,040 a 0,120	–	²⁾
Altamente reactivo	Mayor que 0,120	Mayor que 0,04	Igual o mayor que 0,10

1. Grado de reactividad del agregado

Dimensión del elemento estructural y ambiente que lo rodea	Grado de reactividad alcalina del agregado (ver tabla B.1)		
	No reactivo	Moderadamente reactivo	Altamente reactivo
No masivo y seco ^{1),2)}	1	1	2
Masivo y seco ^{1),2)}	1	2	3
Hormigón expuesto al aire húmedo, enterrado o sumergido ³⁾	1	3	4

2. Definir la categoría de la estructura

Categoría de la estructura	Riesgo asociado	Ejemplos ¹⁾
S1	Bajo	<ul style="list-style-type: none"> – Elementos temporarios (vida útil en servicio requerida menor o igual a 5 años); – Elementos de fácil reemplazo.
S2	Normal	La mayor parte de las construcciones y estructuras de ingeniería civil con vida útil en servicio prevista entre 5 años y 75 años.
S3	Elevado	Hormigones de alto desempeño o estructuras altamente críticas con vida útil en servicio prevista mayor que 75 años o para las cuales una reparación importante es imposible o muy costosa. Por ejemplo: <ul style="list-style-type: none"> a) instalaciones nucleares; b) presas; c) túneles; d) puentes o viaductos importantes; e) estructuras de contención de productos peligrosos.

Reacción álcali sílice

Esquema de decisión IRAM 1531

3. Nivel de riesgo

Nivel de riesgo de RAS (ver tabla B.2)	Categoría de la estructura (ver tabla B.3)		
	S ₁	S ₂	S ₃
1	A	A	A
2	A	B	C
3	A	C	D
4	B	D	E

A: se acepta el agregado sin necesidad de adoptar medidas de acción preventivas. Es necesario, sin embargo, asegurar mediante controles periódicos, que la reactividad del agregado extraído no ha cambiado.
B, C, D, E: se acepta el agregado adoptando medidas de acción preventivas (ver tablas B.5 y B.6).

4. Nivel de prevención a adoptar

Nivel de prevención	Contenido máximo de álcalis aportados por el cemento (kg de Na ₂ O _{eq} /m ³) ¹⁾
B	3,0
C	2,4
D	1,8

5. Contenido mínimo de AMAs en el cemento, para prevenir RAS

AMA	Contenido de álcalis de la adición (% Na ₂ O _{eq})	Contenido mínimo de adiciones en el cemento (% en masa) ^{1), 2)}		
		Nivel de prevención B	Nivel de prevención C	Nivel de prevención D
Escoria granulada de alto horno	Menor que 1,0 ³⁾	25,0	35,0	50,0
Ceniza volante ⁴⁾	Menor que 3,0	15,0	20,0	25,0
	De 3,0 a 4,5	20,0	25,0	30,0
Puzolanas naturales	Las puzolanas naturales utilizadas deben cumplir con los requisitos de la IRAM 50000 y demostrar ser efectivas en la inhibición de la RAS cumpliendo con C.1 o C.2 (ver anexo C)			

Reacción álcali sílice

Evaluación de reactividad alcalina residual (FHWA)

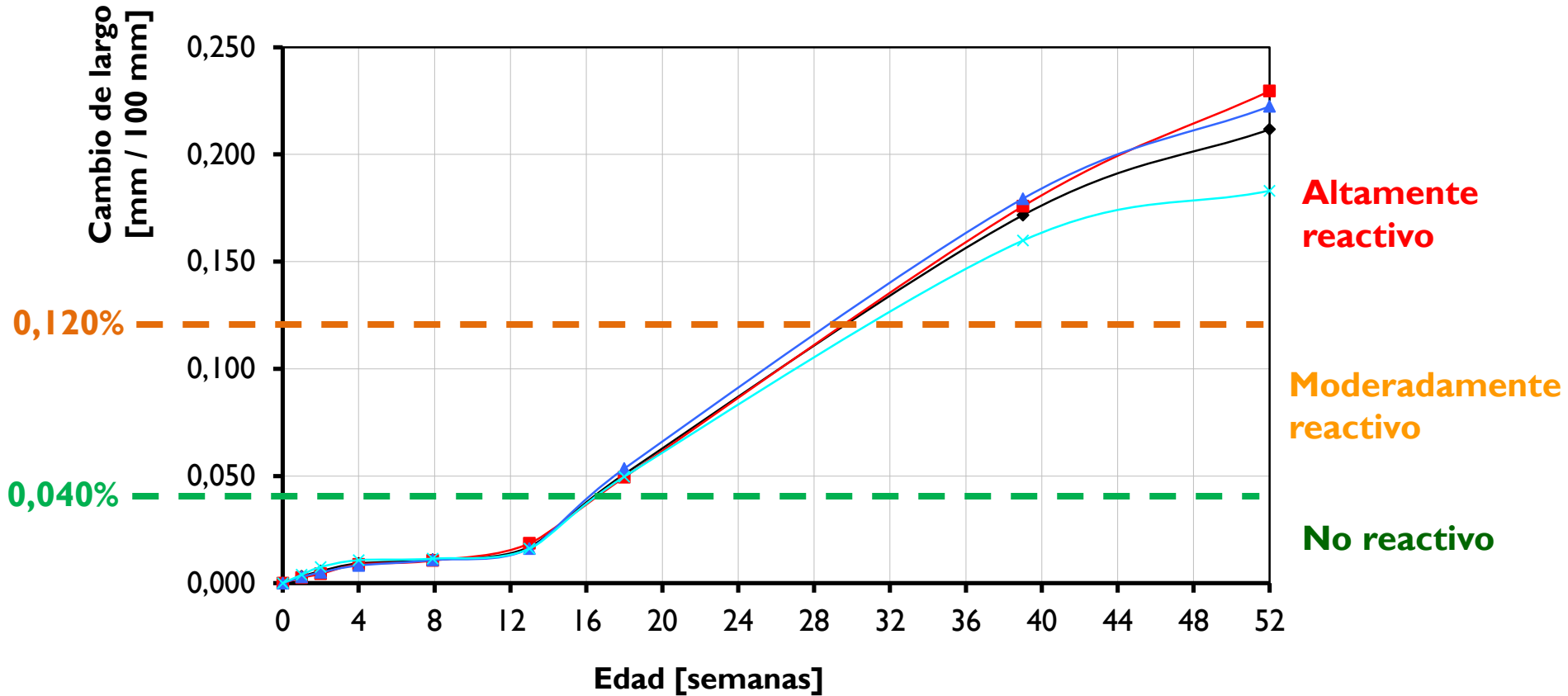


- Inmersión de testigos en solución 1N de hidróxido de sodio (NaOH), a 38 °C
- Mediciones: 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 16, 20, 24, 30, 36, 44 y 52 semanas
- **Límite:** 0,040% luego de 1 año
- No es normativo en Argentina



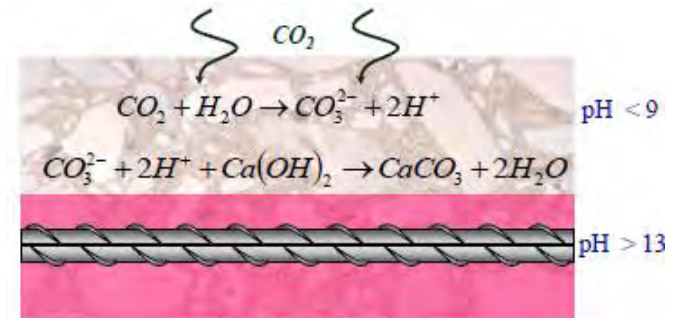
Reacción álcali sílice

Ejemplo evaluación de reactividad alcalina residual



Corrosión de armaduras y pasadores

Carbonatación



Martirena

¿Qué sucede?

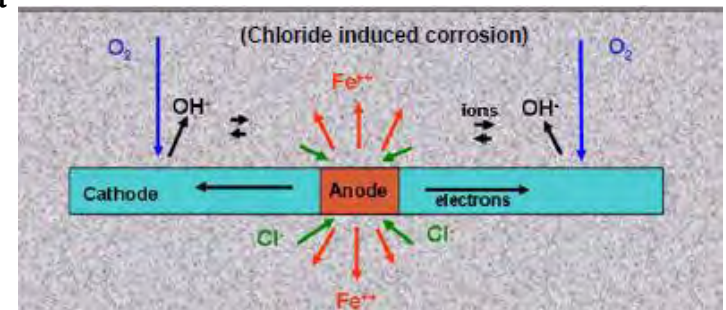
- El acero (Fe metálico) se “oxida” y se convierte en Fe_2O_3
- Disminuye la sección resistente de acero (afecta la capacidad de transferencia de cargas) y puede producir fisuración en el hormigón
- El hormigón está normalmente protegido por su alta alcalinidad ($\text{pH} \approx 12,5 - 13$), “pasivación”, excepto:

Carbonatación: $\text{pH} < \sim 9$
Cloruros

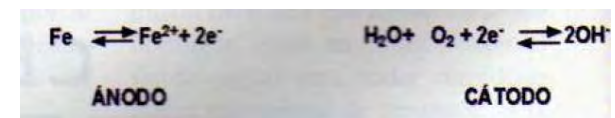
Influyen:

- Aporte de oxígeno
- Disponibilidad de agua líquida (electrolito)

Ingreso de Cl^-

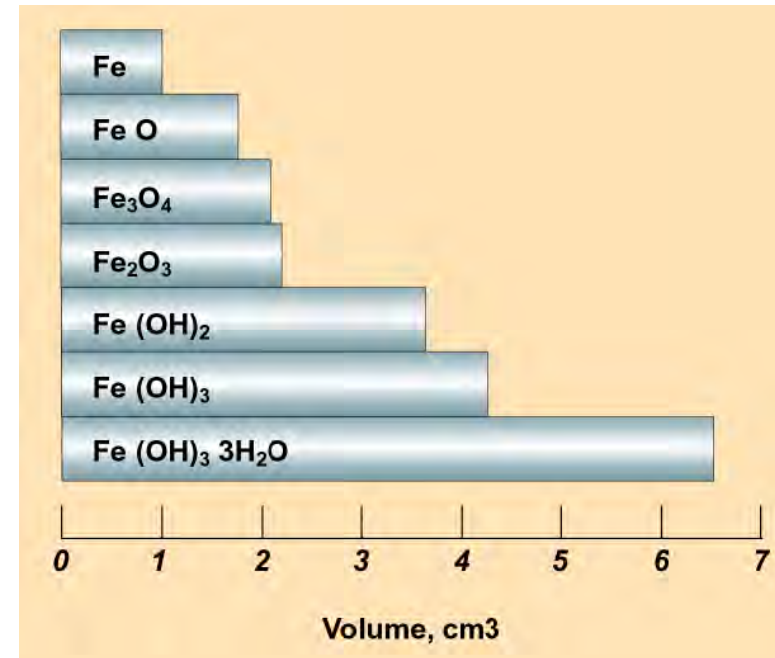
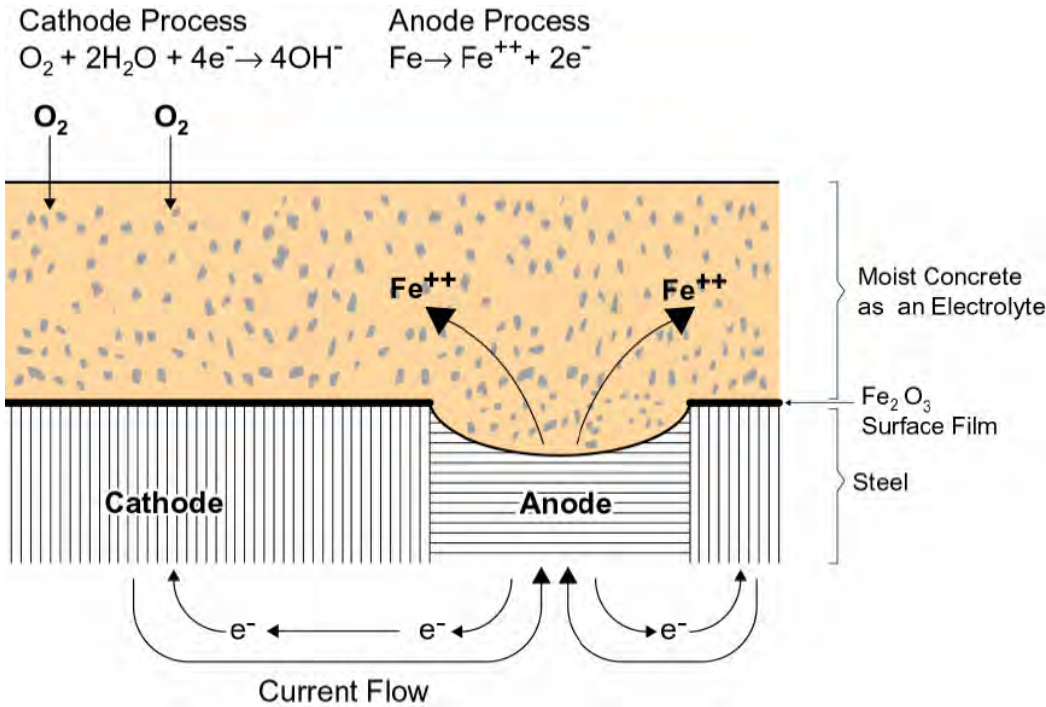


Sagués



El volumen de la masa metálica puede incrementarse hasta 700 %

Corrosión de armaduras y pasadores



**Mehta,
Monteiro**

Ataque por sulfatos

¿Qué sucede?

- **Sulfatos + agua + aluminatos**
- Las soluciones que contienen sulfatos reaccionan con el CH y el C_3A para formar yeso y sulfoaluminato de calcio (etringita) → **generan cambios volumétricos (expansiones)**
- Hormigón debe estar húmedo durante períodos prolongados
- Ataque interno o externo
- Se ha demostrado experimentalmente que sólo fueron atacados hormigones de baja calidad (CUC < 300 kg/m³) y para contenidos de sulfatos > 4.0% del peso de cemento

¿Cómo lo prevenimos?

- **Cementos ARS o MRS** (menos aluminatos), o **CPN con adición mineral adecuada** (no cálcicas)
- **Relación a / c máxima + CUC mínimo**
- **Prevenir acceso de sulfatos al hormigón**



Ataque químico

¿Qué sucede?

- Reacción entre el ácido de ataque y los productos de hidratación del cemento (CH y CSH)
- Se forman **sales de calcio**, y se deteriora la pasta cementicia
- La velocidad de daño está controlada por la solubilidad de la sal formada. Es más severo cuando existe flujo de agua
- **Ejemplos del ataque:** ácidos orgánicos, efluentes industriales o del agro, entre otros

¿Cómo lo prevenimos?

- Analizar el contaminante, el pH de la solución, y si existe la circulación de agua
- Las puzolanas y escorias disminuyen la provisión de CH y la porosidad
- La permeabilidad es menos importante en el caso de ataque por ácidos

Propiedades y durabilidad de los hormigones

Ing. Matías Polzinetti

matias.polzinetti@icpa.org.ar

San Martín 1137 | 1° Piso

Ciudad Autónoma de Buenos Aires | Argentina

Teléfono: (+54 11) 4576 7695 / 7690 | www.icpa.org.ar

