

# TRABAJOS DE RILEM SOBRE ATAQUE QUÍMICO AL HORMIGÓN

Dra. Ing. Esperanza Menéndez  
Grupo Consolider-Sedurec

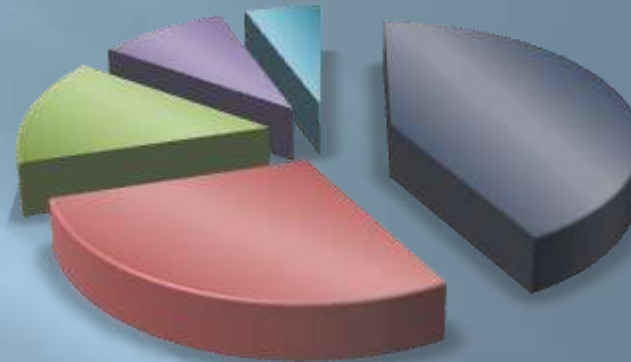
# Esquema:

- Aspectos generales sobre la alteración del hormigón
- Causas de deterioro en estructuras de hormigón
- Comités RILEM sobre ataque químico
- Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments (211-PAE)
- Alkali aggregate reaction in concrete structures: performance testing and appraisal (219-ACS)
- Conclusiones

# Origen del daño en estructuras

## Distribución de daños en construcción:

- Proyecto → 42%
- Ejecución → 28,5%
- Materiales → 14,6%
- Uso → 9,6%
- Varios → 5,7%



- Proyecto
- Ejecución
- Materiales
- Uso
- Varios

## Según ACI y RILEM → Daños en el hormigón:

- Ciclos de hielo-deshielo
- Exposición a agresivos químicos: ataque por sulfatos, ácidos, ión amonio, etc.
- Corrosión de armaduras y de otros materiales embebidos en el hormigón
- Reacción química con los áridos

# RILEM – Comités Técnicos

- Realización de análisis, estudios y recomendaciones sobre una determinada problemática de la construcción
- Los componen especialistas, laboratorios y científicos
- Duración de cinco a siete años
- Elaboran: libros, recomendaciones y artículos científicos en Materials & Structures

## Comités Técnicos relacionados con el ataque químico al hormigón:

- Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments (211-PAE)
- Alkali aggregate reaction in concrete structures: performance testing and appraisal (219-ACS)

# RILEM

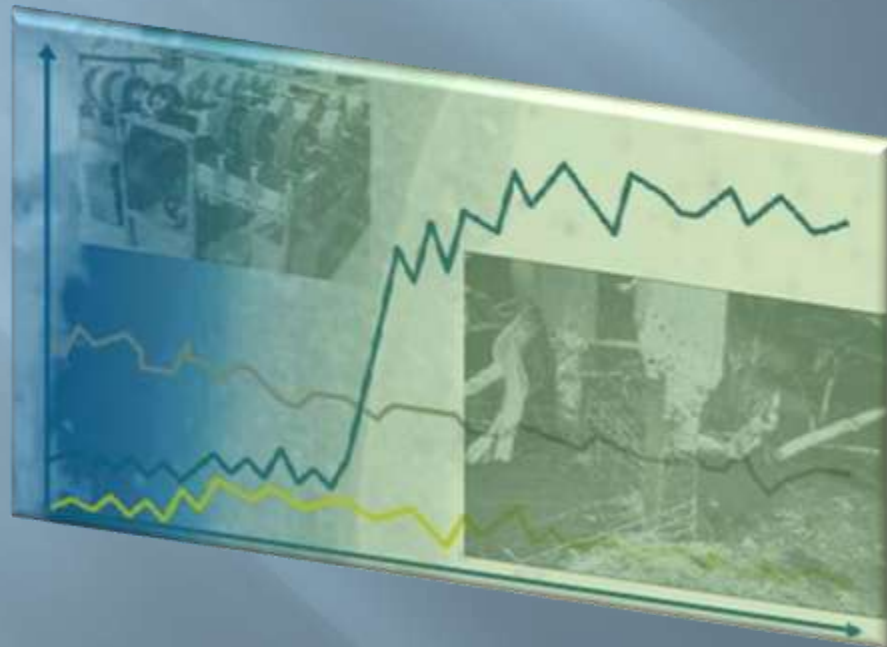
## Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments (211-PAE)

# Ambientes acuosos agresivos – 211 PAE

- ◆ Inicio de actividad: 2003
- ◆ Publicación sobre aspectos analizados: Final 2011

## Aspectos tratados:

- ◆ Ataque externo por sulfatos
- ◆ Ataque por magnesio en agua de mar
- ◆ Ataque por nitrato amónico
- ◆ Ataque por ácidos orgánicos y efluentes agrarios



# ● Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments (211-PAE)

❖ **Ataque externo por sulfatos**

# Ambientes acuosos agresivos - 211 PAE

## Ataque externo por sulfatos

- ◆ **Aspecto externo del daño:**
  - Microfisuración superficial
  - Pérdida de material
  - Depósitos superficiales





# Ambientes acuosos agresivos - 211 PAE

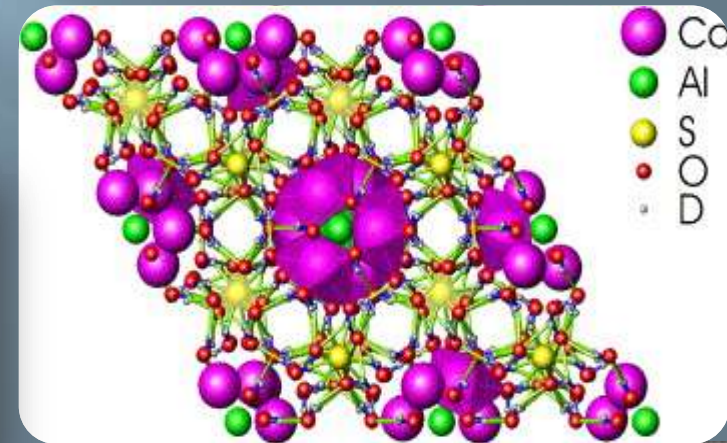
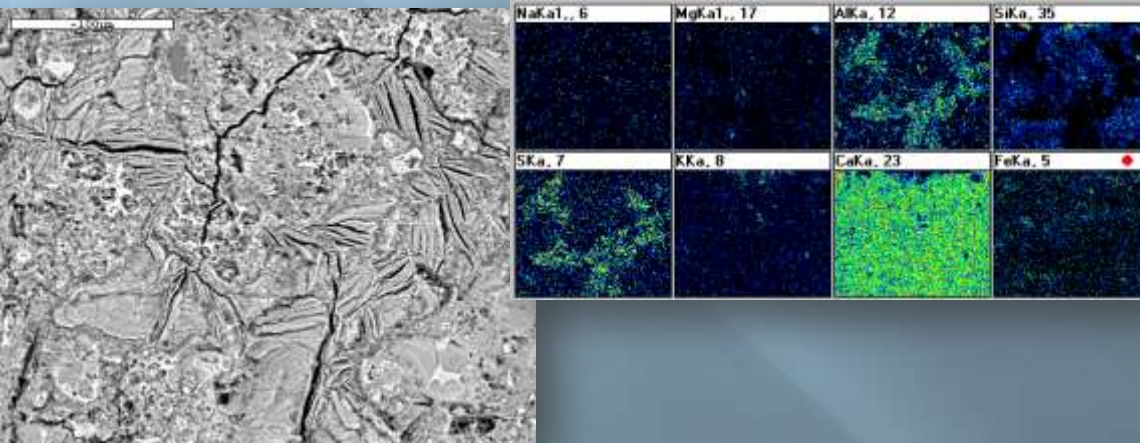
El ataque por sulfatos tiene su origen, de forma general, en la reacción entre los aluminatos procedentes del cemento y los sulfatos presentes en el hormigón. Así mismo pueden producirse reacciones secundarias asociadas con este deterioro, el principal compuesto es la ettringita

## ■ Formación de ettringita

$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 13\text{H}_2\text{O} + 4(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) + 13 \text{H}_2\text{O}$  *ettringita (expansión)*

## ■ Transformación de monosulfo en ettringita

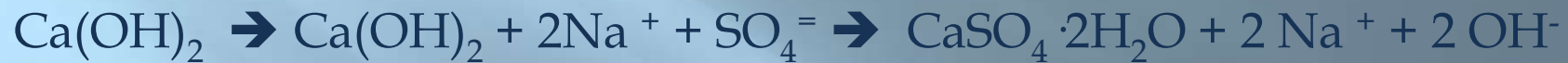
$6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$  *monosulfato cálcico*



# Ambientes acuosos agresivos - 211 PAE

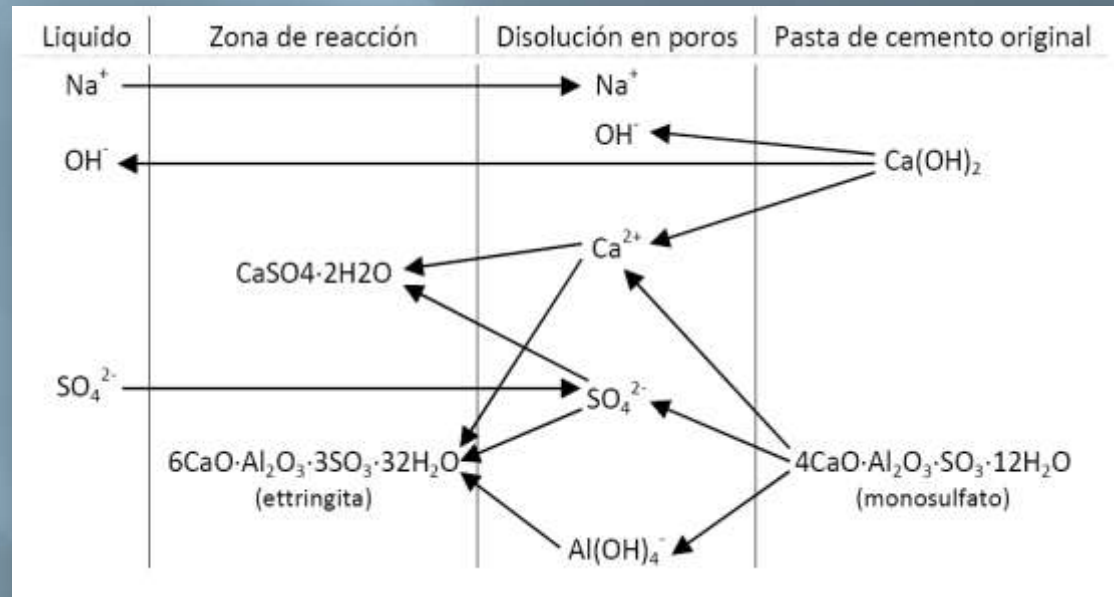
**Reacción de sulfatos alcalinos:** Generalmente los sulfatos alcalinos provienen de aguas agresivas. Además, de la acción de los sulfatos se producen reacciones secundarias con los iones alcalinos.

- **Formación de yeso o ettringita, reacción inicial de la portlandita**



*sólido*                      *disolución*                      *sólido*                      *disolución*  
*yeso secundario (aumento volumen)*

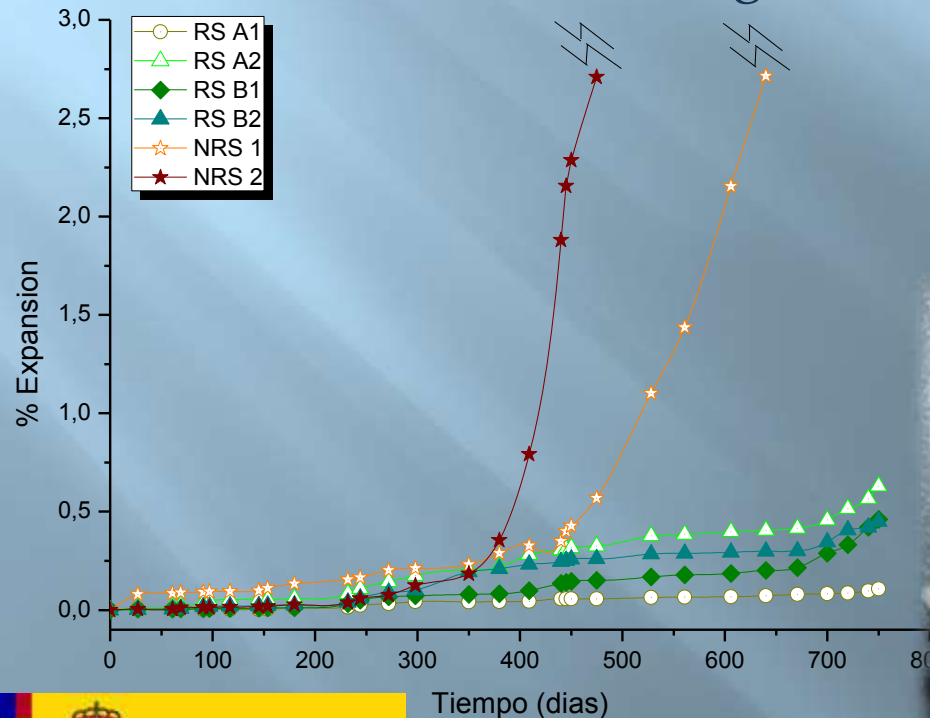
- **Descalcificación del C-S-H**
- **Zonas con distintos tipos y grados de alteración**



# Ambientes acuosos agresivos - 211 PAE

Ensayo de inmersión en disoluciones agresivas:

- Tipo de disolución:  $\text{SO}_4\text{Ca}$  -  $\text{SO}_4\text{Mg}_2$  -  $\text{SO}_4\text{Na}_2$
- Concentración de la disolución:
  - ASTM C1012  $\rightarrow$  33.800 mg/l  $\text{SO}_4^-$ 
    - EH-E: Ataque fuerte  $>$  3.000 mg/l  $\text{SO}_4^-$
    - ACI: Altamente agresivo 6.000 -10.000 mg/l  $\text{SO}_4^-$



# ● Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments (211-PAE)

❖ **Ataque por magnesio en agua de mar**

# Ambientes acuáticos agresivos - 211 PAE

## Agua de mar



# Ambientes acuosos agresivos - 211 PAE

**Reacción de sulfato magnésico:** Se produce por la acción de disoluciones acuosas ricas en magnesio.

- Reacción de la portlandita para formar yeso o ettringita
- Intercambio iónico calcio-magnesio → Formación de brucita

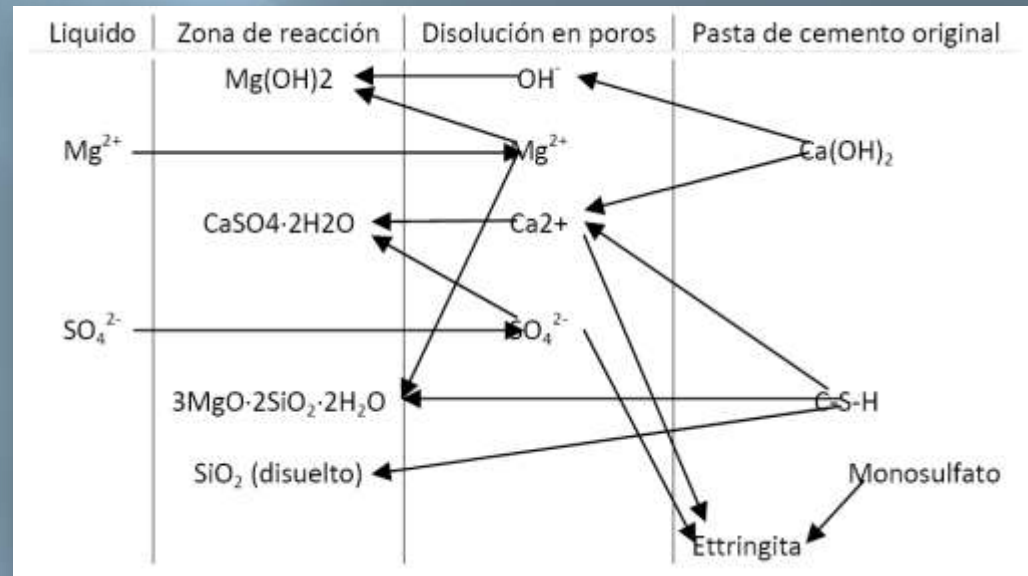


*sólido*

*disolución*

*brucita*

- Descomposición gradual del C-S-H, formar silicatos hidratados amorfos y/o silicatos hidratados magnésicos
- Alteración más rápida del gel C-S-H



# Ambientes acuosos agresivos - 211 PAE

## Agua de mar

Una de las situaciones más habituales es la presencia de **agua de mar** en contacto con estructuras de hormigón.

### ■ Acción de sulfato magnésico

### ■ Acción de los cloruros

- Intercambio iónico, formación de brucita,...

- Acción del  $\text{CaCl}_2$



*Sal de Friedel (Expansión)*

- Sal de Friedel +  $\text{SO}_3 \rightarrow \text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$

*Ettringita (Expansión)*

- Ettringita +  $\text{CO}_2 + \text{SiO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \cdot \text{SO}_4 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$

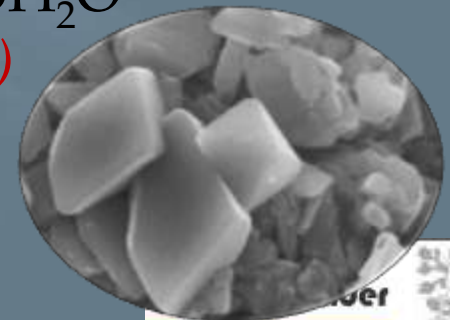
*Thaumasita (Expansión)*

### ■ Acción del $\text{CO}_2$

- Carbonatación de la portlandita



*Aragonito o calcita (Recubrimiento)*



# ● Performance of cement-based materials in aggressive aqueous environments (211-PAE)

## ❖ Ataque por ácidos



# Ambientes acuosos agresivos - 211 PAE

## Ácidos



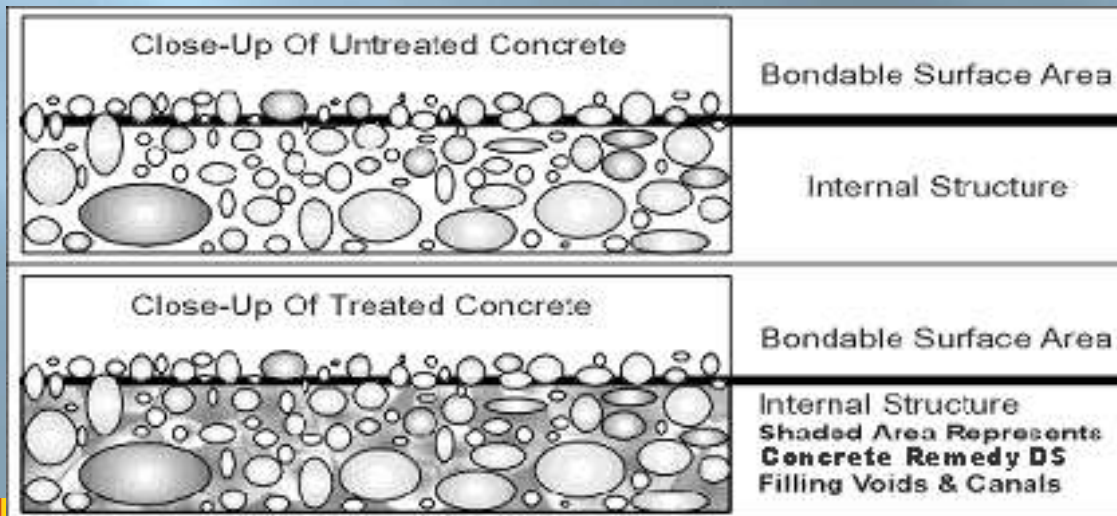
Probetas con KF-A a los 16 ciclos.



Probetas con KF-A a los 50 ciclos.



Muestra de control, expuesta a una disolución de ácido al 10%.

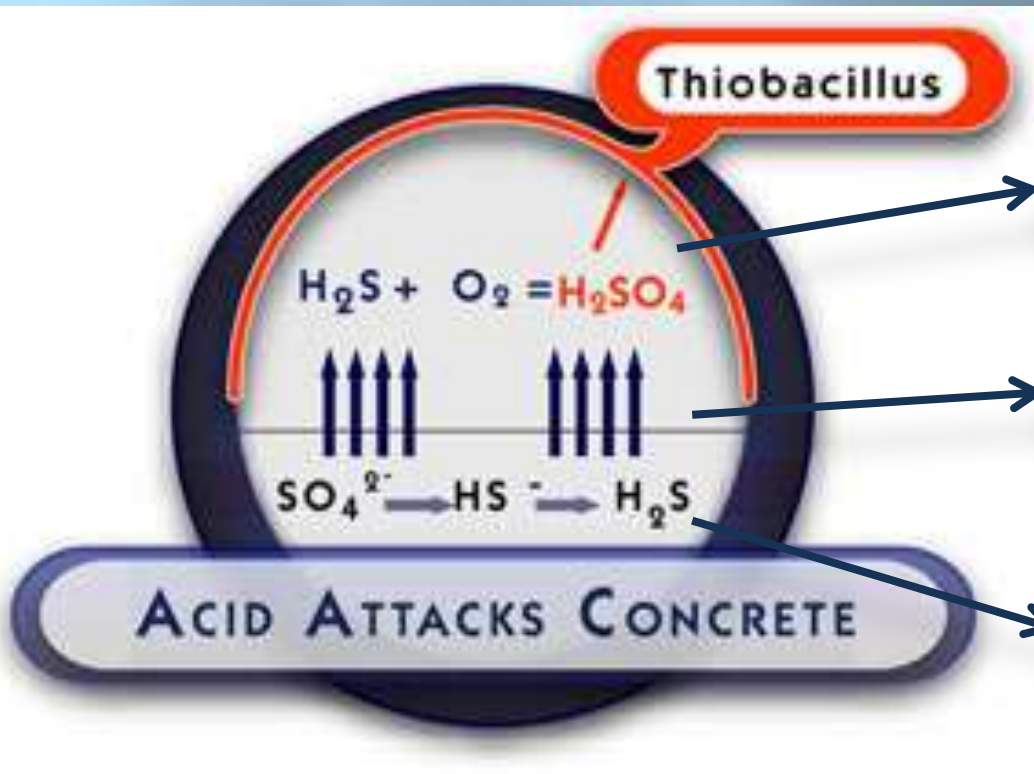


# Ambientes acuosos agresivos - 211 PAE

## Ácidos

### ■ Acción de los ácidos

- Reacciones de neutralización
- Descomposición del gel C-S-H y de la portlandita
- Descalcificación de la pasta cementante



### Áreas de exposición

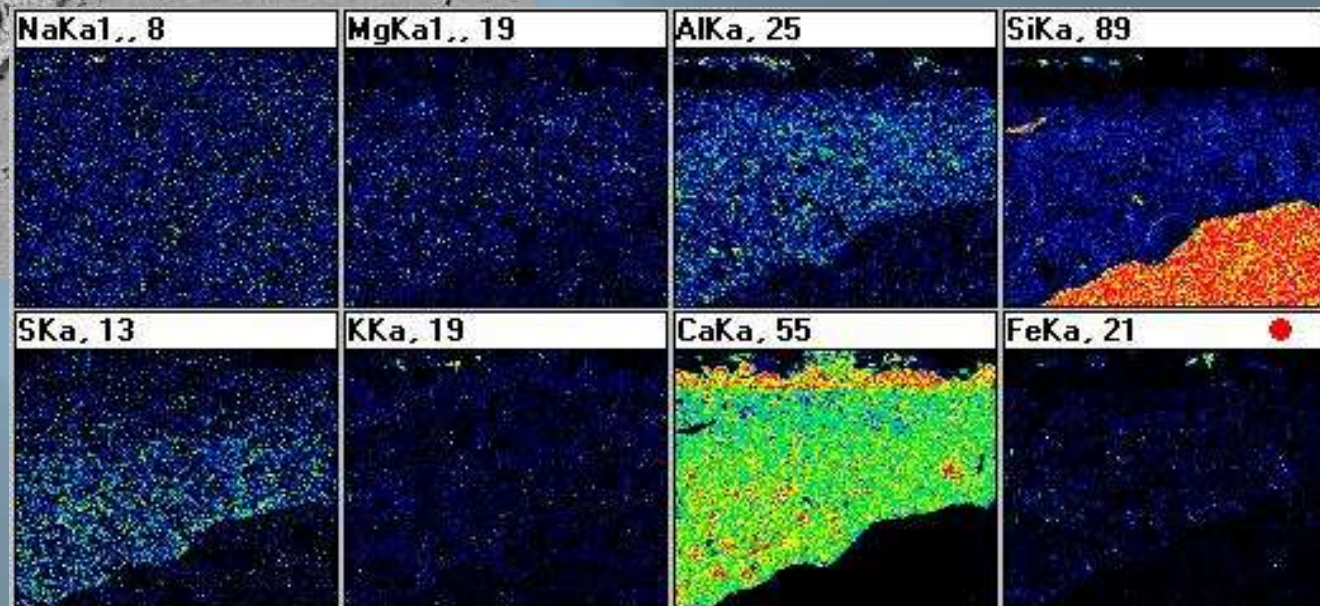
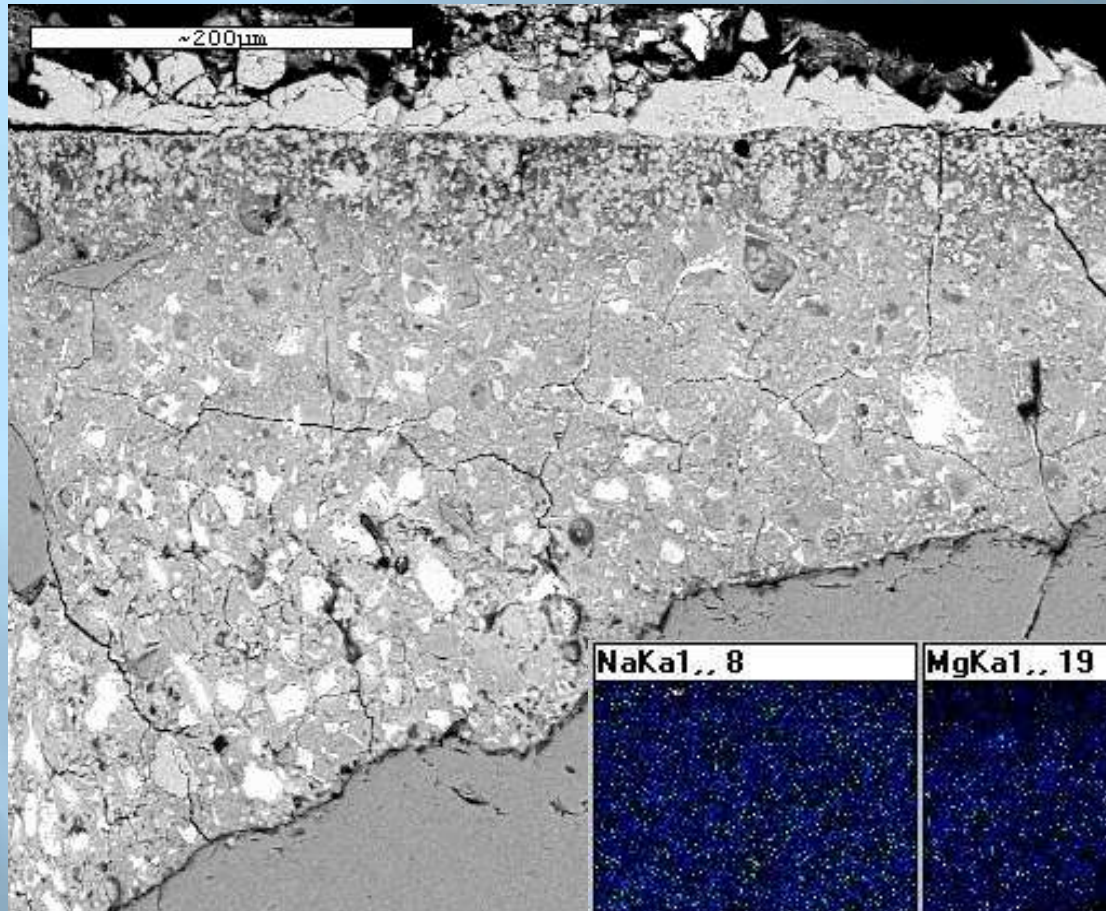
Ataque ácido

Ataque ácido + Ataque por sulfatos + Acción mecánica

Ataque por sulfatos

# Ambientes acuosos agresivos - 211 PAE

## Ácidos



# RILEM

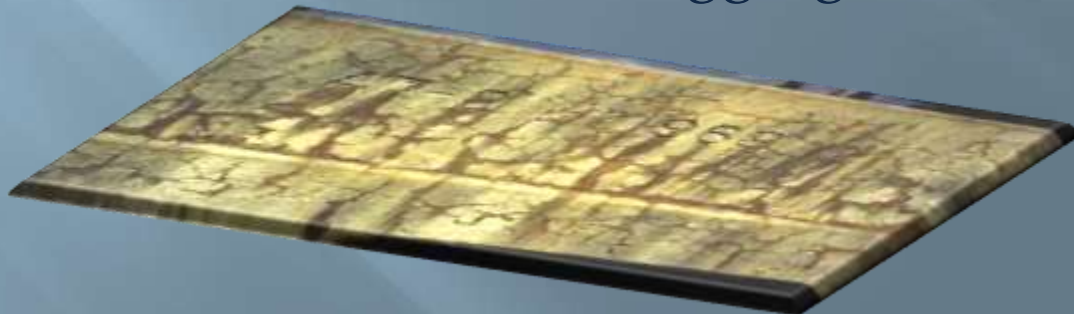
## Alkali aggregate reaction in concrete structures: performance testing and appraisal (219-ACS)

# Reacción árido-álcali - 219 ACS

- ◆ Inicio de actividad: 2006
- ◆ Diversos documentos para ser publicados

## Aspectos tratados:

- ◆ AAR 0: Guía para uso de métodos de evaluación RILEM
- ◆ AAR 1: Análisis petrográfico
- ◆ AAR 2: Método acelerado de barras de mortero
- ◆ AAR 3: Método de prismas de hormigón a 38°C
- ◆ AAR 4-1: Método de prismas de hormigón a 60°C
- ◆ AAR 6-1: Guía de diagnosis de estructuras dañadas por AAR
- ◆ AAR 7-1: Minimización de daño por ASR en hormigón
- ◆ AAR 7-2: Minimización de daño por ACR en hormigón
- ◆ AAR 8: Extraction of alkalis from aggregates



# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Árido-álcali:

- Fisuración en mapa
- Exudación de geles
- Expansión



- Reacción árido silíceo y álcalis:

- ✓ Reacción de la sílice amorfa con los álcalis:



(Reacción ácido-base)



(Neutralización)

Ataque a los puentes siloxano:



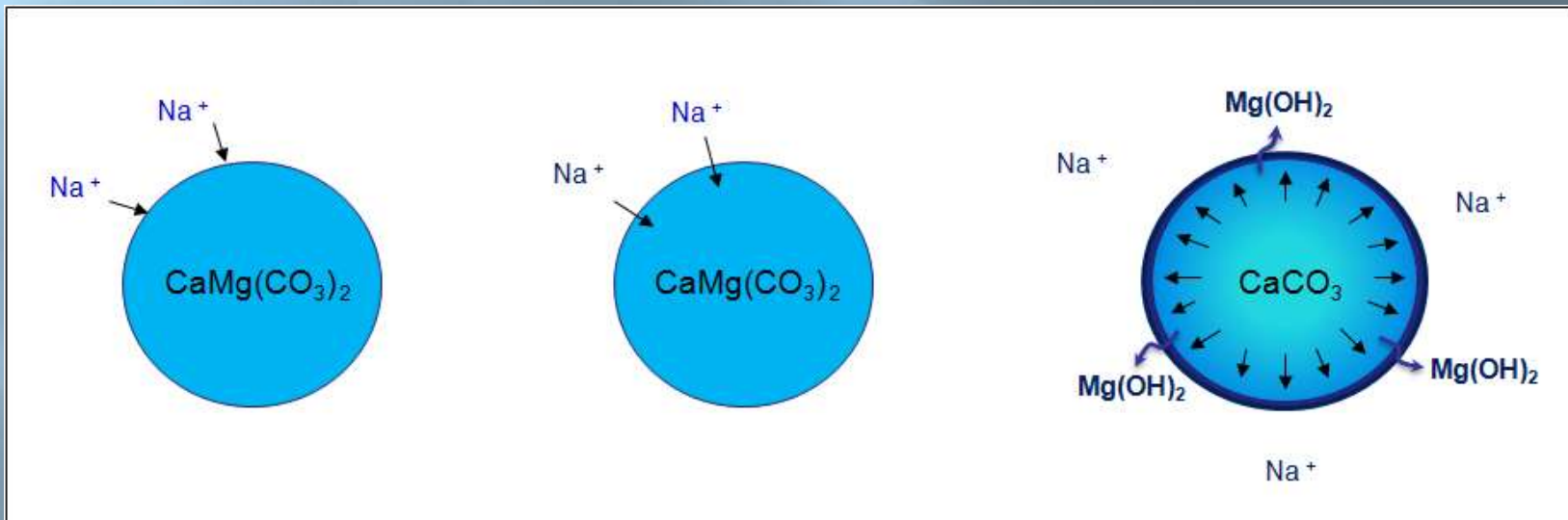
# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Reacción álcali-carbonato (desdolomitización)

### 1. Desdolomitización:



### 2. Regeneración del hidróxido alcalino



- Alkali aggregate reaction in concrete structures: performance testing and appraisal (219-ACS)

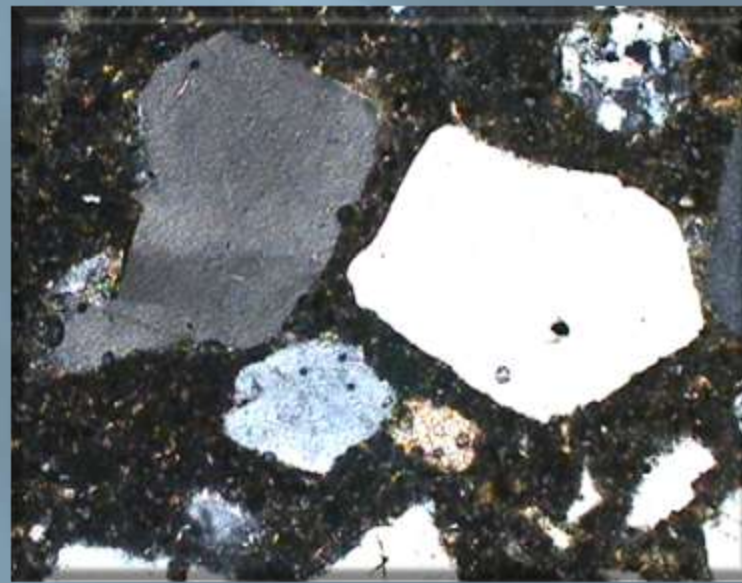
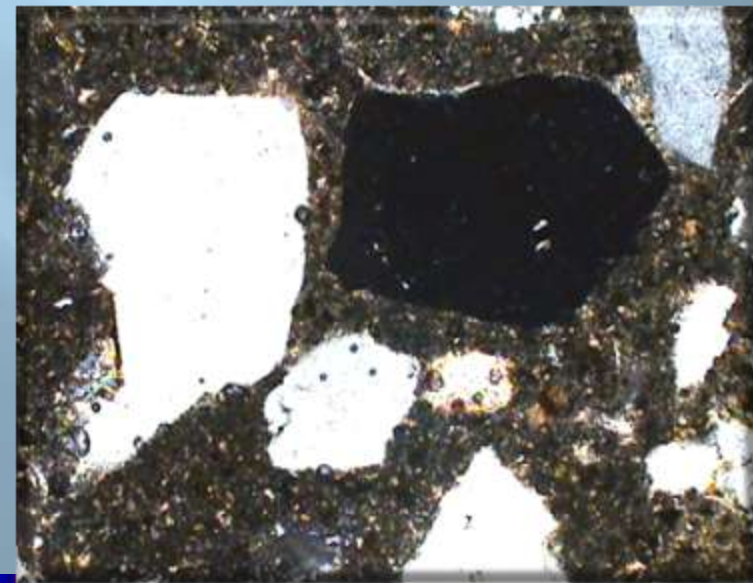
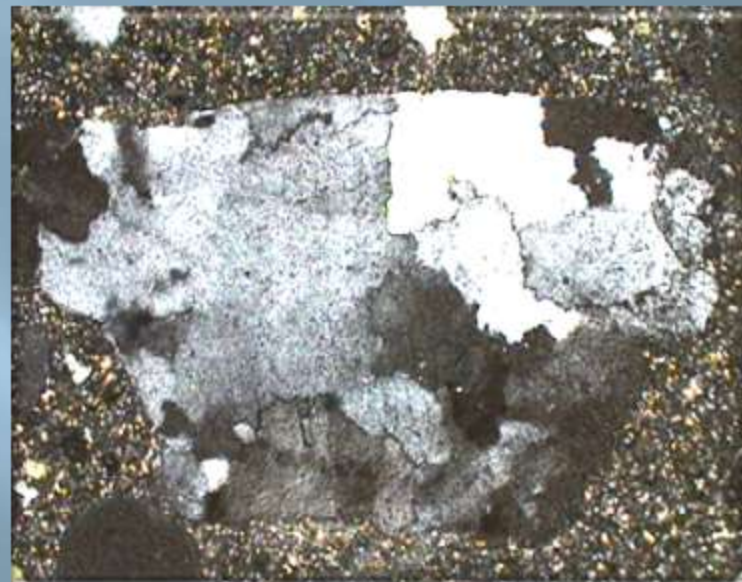
- ❖ **Análisis petrográfico**



# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Análisis petrográfico

Análisis por  
lámina delgada



# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Análisis petrográfico

Orden de reactividad de los áridos silíceos:

Cuarzo  
deformado

Cristal  
volcánico

Chert

Calcedonia

Cuarzo  
Criptocristalino

Cuarzo  
microcristalino

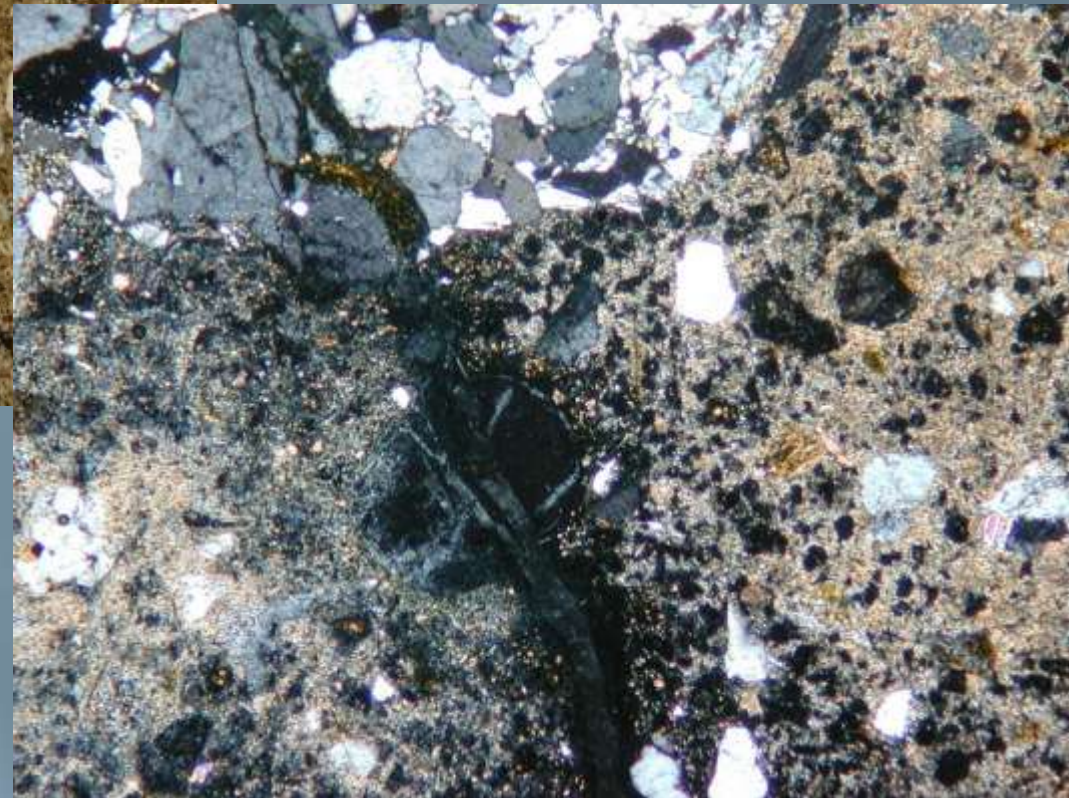
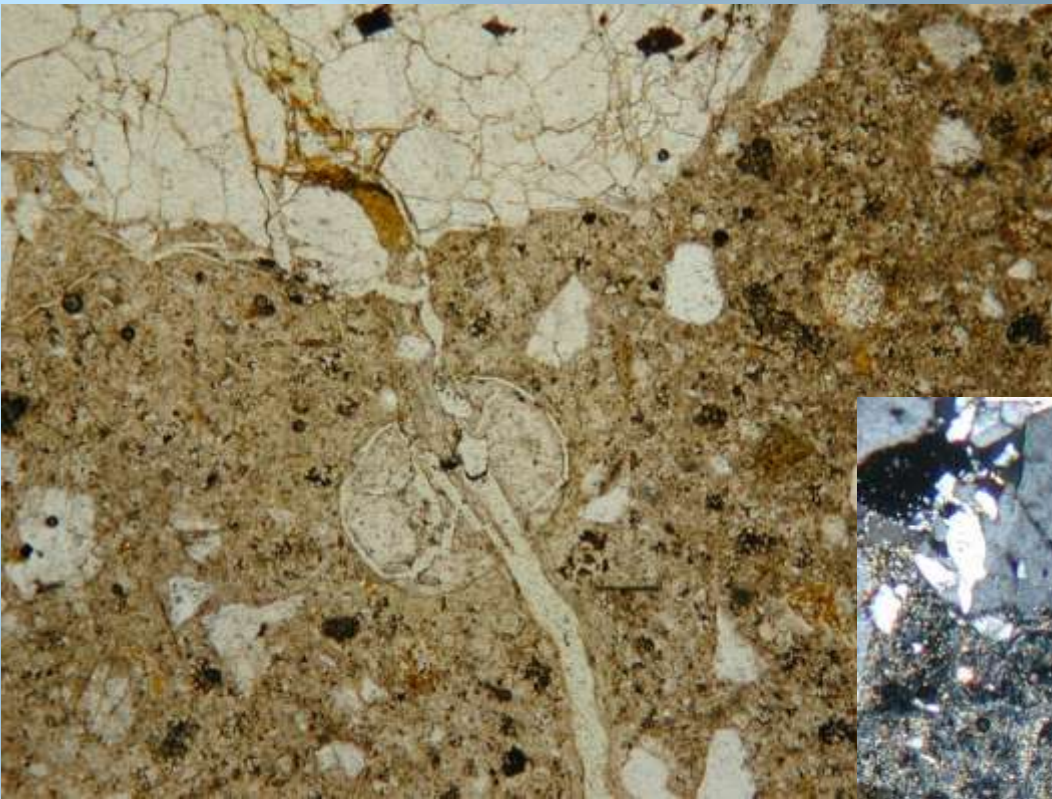
Tridimita

Cristobalita

Ópalo

# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Análisis petrográfico



- Alkali aggregate reaction in concrete structures: performance testing and appraisal (219-ACS)

- ❖ Método acelerado de barras de mortero

# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Método acelerado de barras de mortero

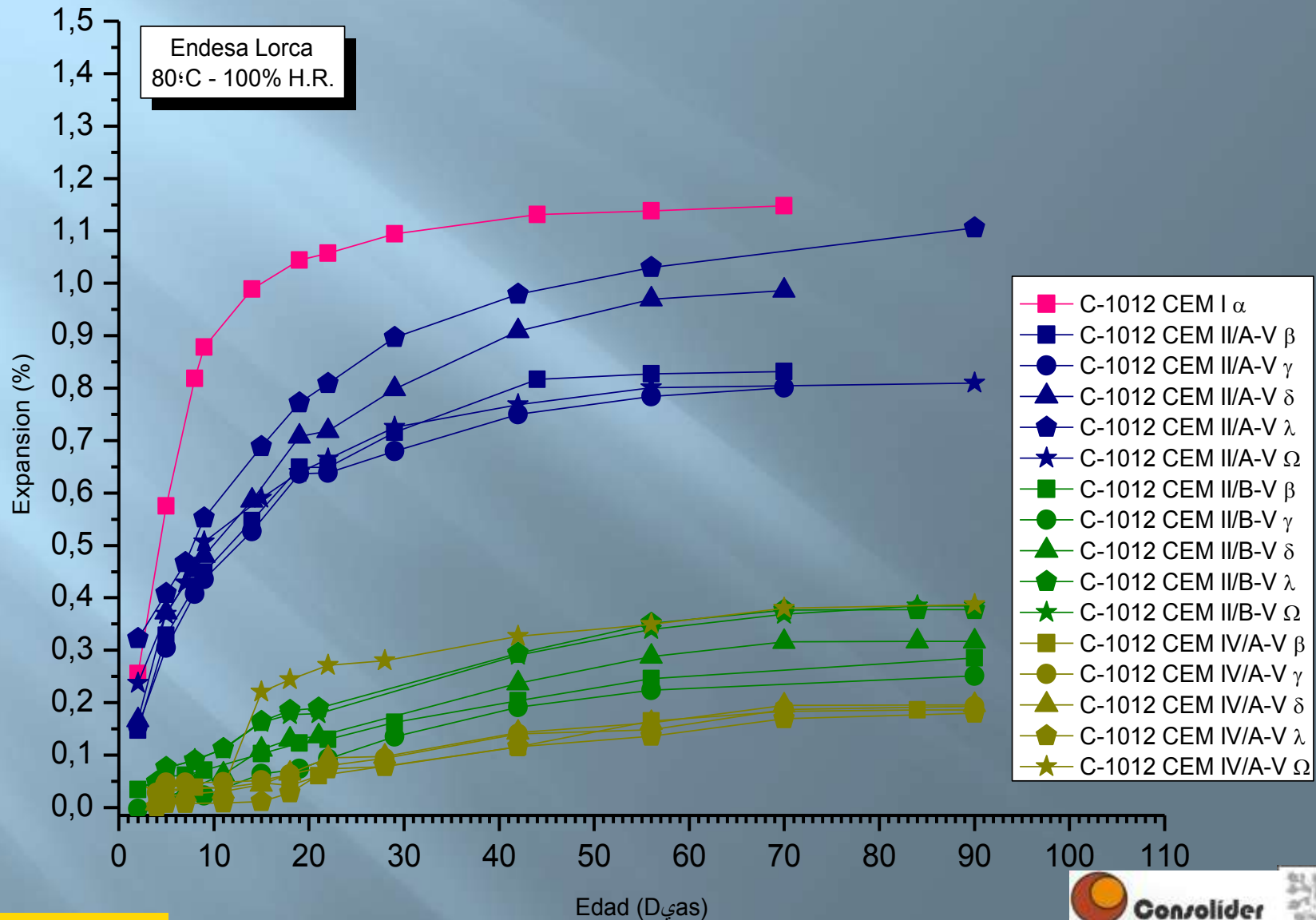
### Ensayo de barras de mortero

- Barras de 2,5x2,5x28 cm con índices
- 80°C y Na(OH) 1N
- 14 o 28 días
- Límite = 0,20%



# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Método acelerado de barras de mortero



- Alkali aggregate reaction in concrete structures: performance testing and appraisal (219-ACS)

- ❖ Método de prismas de hormigón

# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Prismas de microhormigón

### Ensayo de prismas de microhormigón

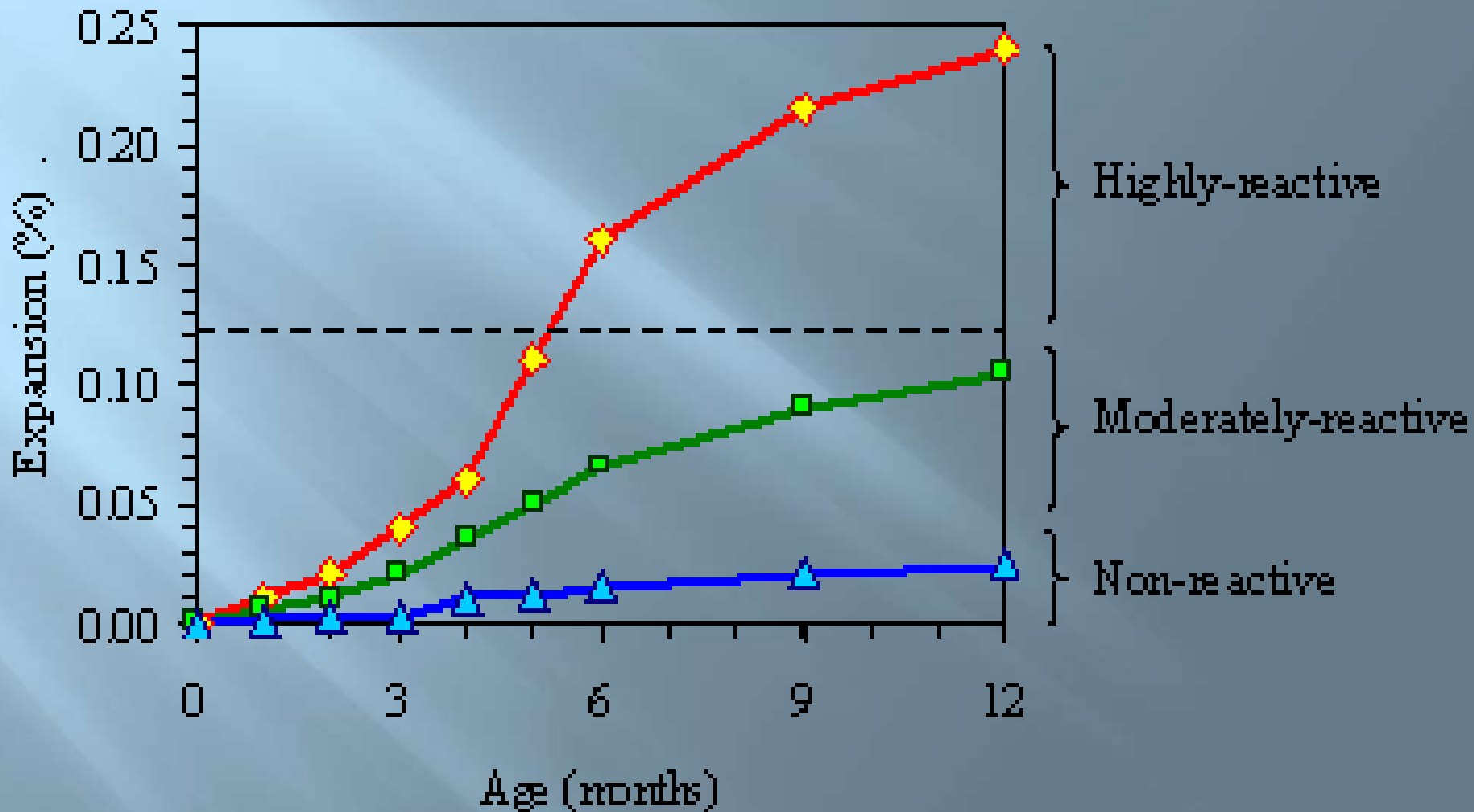
- Barras de 7,5x7,5x28 cm con índices
- 38°C y 100% H.R. y 1,25% de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$
- 1 año
- Límite = 0,04%





# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Prismas de microhormigón



- Alkali aggregate reaction in concrete structures: performance testing and appraisal (219-ACS)

- ❖ Método de prismas de hormigón a 60° C

# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Prismas de microhormigón a 60°C

### Concrete Performance Test:

- Barras de 7,5x7,5x28 cm con índices
- 60°C y 100% H.R. y 5,5 kg/m<sup>3</sup> de Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>
- 15 semanas
- Límite = 0,03%



- Alkali aggregate reaction in concrete structures: performance testing and appraisal (219-ACS)

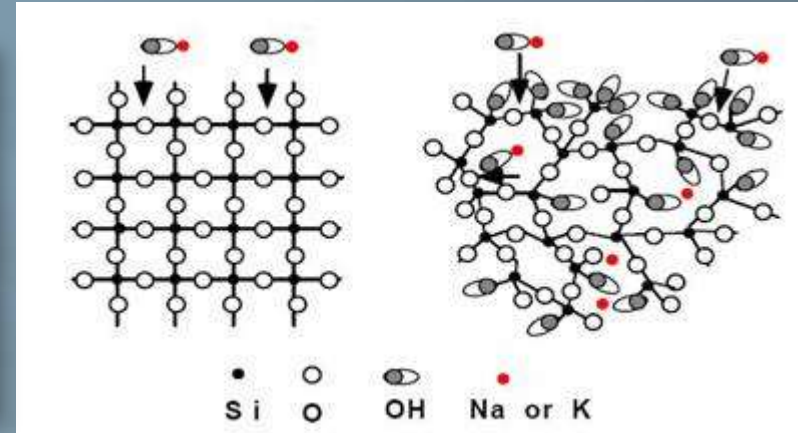
- ❖ Extracción de álcalis

# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Extracción álcalis de áridos

Los áridos, además de cuarzo amorfo, pueden tener álcalis:

- Feldespatos (Na - K - Na/K)
- Extracción en pH elevado
- Incremento álcalis en el hormigón



### Disoluciones de extracción de álcalis a partir de los áridos:

- 1M NaOH (pH = 13,63)
- 1M KOH (pH = 14,13)
- Ca(OH)<sub>2</sub> Sat. (pH = 12,07)
- 0,2M NaOH + Ca(OH)<sub>2</sub> Sat. (pH = 13,81)
- 0,5M KOH + Ca(OH)<sub>2</sub> Sat. (pH = 13,06)
- 0,1M NaOH + 0,6M KOH + Ca(OH)<sub>2</sub> Sat. (pH = 13,31)

### Disoluciones de extracción de álcalis a partir de los áridos:

- Ca(OH)<sub>2</sub> sat+ exceso
- 0,7N NaOH
- 0,7N KOH
- 0,7N NaOH + Ca(OH)<sub>2</sub> sat y exceso
- 0,7N KOH + Ca(OH)<sub>2</sub> sat y exceso

# Reacción árido-álcali - 219 ACS

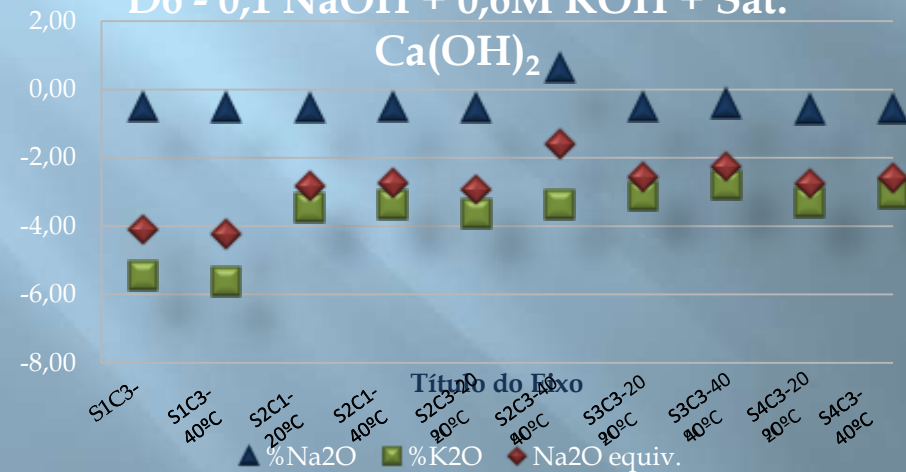
## Extracción álcalis de áridos

### Condiciones de ensayo:

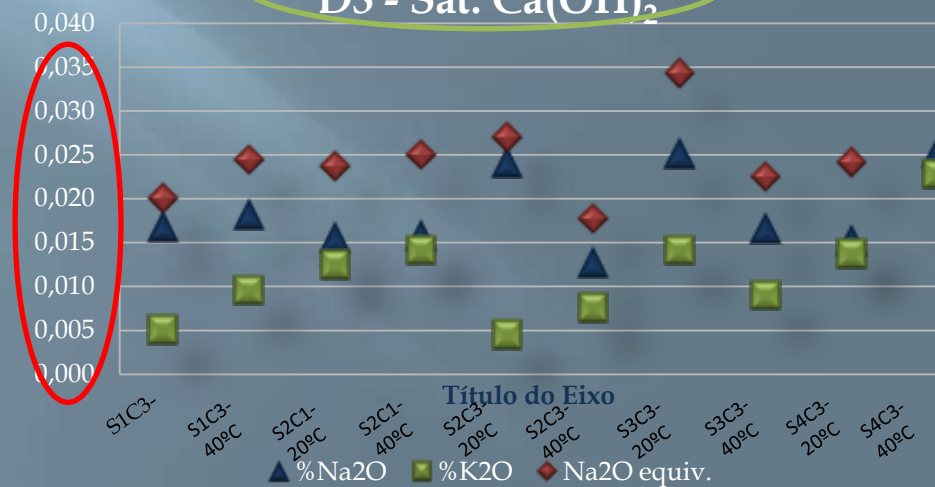
- Temperaturas: 20°C - 38°C - 80°C - 150°C
- Tiempo de ensayo: 24 h. - 48 h. - 28 d. - 180 d. - 365 d.
- Determinaciones:  $\text{Na}_2\text{O}$  -  $\text{K}_2\text{O}$  -  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  - Otros iones - pH - Conduc.
- % álcalis por masa de árido - % de  $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$  en el hormigón

D6 - 0,1 NaOH + 0,6M KOH + Sat.

$\text{Ca(OH)}_2$



D3 - Sat.  $\text{Ca(OH)}_2$



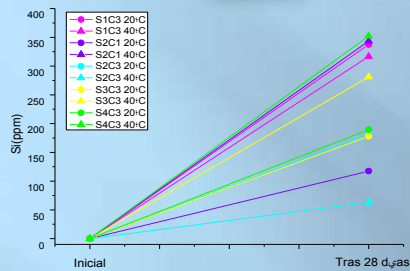
# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Extracción álcalis de áridos

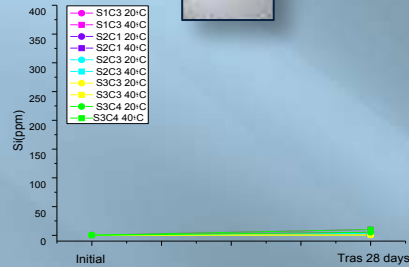
Si extraction

Al extraction

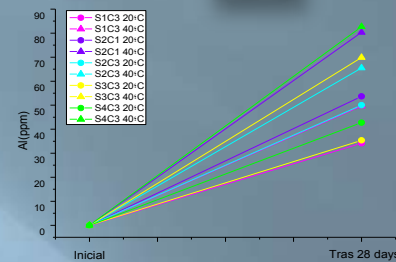
D1



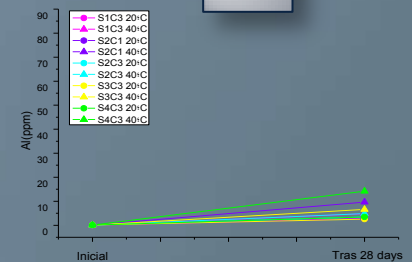
D3



D1

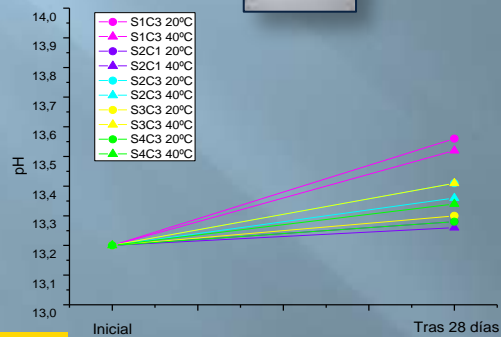


D3

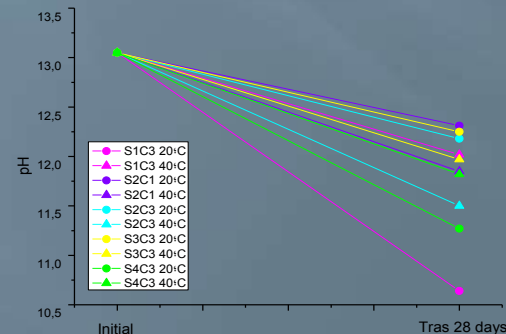


Variación de pH

D1



D3



- Alkali aggregate reaction in concrete structures: performance testing and appraisal (219-ACS)

  - ❖ **Diagnosis de estructuras dañadas**



# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Diagnóstico de estructuras dañadas

**Table 1. Structures classified by risk category**

| Category - consequences of damage   | Acceptability of ASR damage               | Examples   |
|---|---|--|
| <p><b>S 1</b><br/>Safety, economic or environmental consequences of deterioration small or negligible</p> | Some deterioration from ASR is acceptable | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Non load-bearing elements inside buildings</li> <li>• Temporary or short service life structures (likely design life 10 to 20 years)</li> <li>• Small numbers of easily replaceable elements</li> <li>• Most low-rise domestic structures</li> </ul>  |
| <p><b>S 2</b><br/>Some safety, economic or environmental consequences if major deterioration</p>          | Minor ASR damage is acceptable/manageable | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Most building and civil engineering structures</li> <li>• Precast elements where economic costs of replacement are severe; e.g. railway sleepers</li> <li>• Normally designed for service life up to 100years</li> </ul>  |
| <p><b>S 3</b><br/>Serious safety, economic or environmental consequences if any deterioration</p>         | No significant damage acceptable          | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Long service life (+100years) or highly critical structures/elements where the risk of deterioration from AAR damage is judged unacceptable, such as:</li> <li>• Nuclear installations, dams, tunnels</li> <li>• Exceptionally important bridges or viaducts</li> <li>• Structures retaining hazardous materials</li> <li>• Exceptionally critical elements impossible/very difficult to inspect or replace/repair</li> <li>• Structures where the economic risk of non-serviceability would be unacceptable</li> </ul> |

# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Diagnóstico de estructuras dañadas

**Table 2. Environmental classes**

| Environmental class | Description   | Environment of concrete (see Note)  |
|---------------------|---|---|
| E1                  | Dry environment protected from extraneous moisture      | <ul style="list-style-type: none"> <li>Internal concrete within buildings in dry (1) service conditions</li> </ul>  |
| E2                  | Exposed to extraneous moisture                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>Internal concrete in buildings where humidity is high; e.g. laundries, tanks, swimming pools</li> <li>Concrete exposed to moisture from the external atmosphere, to non-aggressive ground or immersed in water.</li> <li>Internal mass concrete should be included in this category (2)</li> </ul>   |
| E3                  | Exposed to extraneous moisture plus aggravating factors | <ul style="list-style-type: none"> <li>Internal or external concrete exposed to deicing salts</li> <li>Concrete exposed to wetting and drying by seawater (3) or to salt spray</li> <li>Concrete exposed to freezing and thawing whilst wet</li> <li>Concrete subjected to prolonged elevated temperatures whilst wet</li> <li>Concrete roads subject to fluctuating loads</li> </ul> |

**Notes:**

1. A dry environment corresponds to an ambient average relative humidity condition lower than 75% (normally only found inside buildings) and no exposure to external moisture sources.

2. A risk of alkali-silica reaction exists for mass concrete elements in a dry environment because the internal concrete may still have a high relative humidity. Vulnerable mass concrete elements are those with a least dimension of 1 m or more.

3. Concrete constantly immersed in seawater does not suffer a higher risk of ASR than a similar element exposed to humid air, buried in the ground, or immersed in pure water, because the alkali concentration of sea water is lower than the alkali concentration of the pore solution of most concretes, and the penetration of chloride ions is usually limited to a few centimetres.

# Reacción árido-álcali - 219 ACS

## Diagnosis de estructuras dañadas

### The level of precaution

- P1. No special precautions against AAR
- P2. Normal level of precaution
- P3. Special level of precaution
- P4. Extraordinary level of precaution

**Table 3. Determination of level of precaution**

|                                     | Environment Category (see Table 2) |    |    |
|-------------------------------------|------------------------------------|----|----|
|                                     | E1                                 | E2 | E3 |
| Category of Structure (see Table 1) | Level of Precaution                |    |    |
| S1                                  | P1                                 | P1 | P1 |
| S2                                  | P1                                 | P2 | P3 |
| S3                                  | P2                                 | P4 | P4 |

# Conclusiones:

- Prevenir el daño químico al hormigón requiere el conocimiento tanto del mecanismo de reacción como de los factores que influyen en su aparición.
- Los métodos de ensayo están basados en estos factores de influencia, pero pueden alejarse de la realidad del hormigón en su ambiente real.
- Es importante definir los niveles de requerimiento para distintas clases de exposición, en función de la importancia del riesgo y de las consecuencias de un determinado fallo.

# GRACIAS POR SU ATENCIÓN