

ALTERACIÓN, DURABILIDAD Y CONSERVACIÓN DE MATERIALES ROCOSOS

Tema 7. DURABILIDAD **Métodos indirectos y ensayos experimentales**



DURABILIDAD

ÍNDICE

- **Introducción:** concepto, aplicaciones, interés, metodología
- **Métodos indirectos:** petrografía, propiedades
- **Ensayos experimentales:** tipos, envejecimiento (EEAA)
 - Preparación muestras
 - Procedimiento experimental
 - Valoración de los resultados
- **Conclusiones:** correlación entre ensayos

DURABILIDAD

CONCEPTOS

➤ ALTERABILIDAD

Susceptibilidad o tendencia de un material a alterarse.

➤ DURABILIDAD

Resistencia de un material a alterarse.

Mantenimiento de sus características en el tiempo.

APLICACIONES

- Materiales pétreos (naturales, artificiales), cerámicos, morteros...
- Materiales sanos, alterados, tratados (consolidantes, protectores)...

► Alonso F.J. (2013). *Durabilidad de materiales rocosos*. Documento interno, Dpto. Geología, Univ. Oviedo, 20 p.



DURABILIDAD

INTERÉS

- Comportamiento de los materiales
- Estudio de la alteración: procesos, causas y efectos
- Determinación de índices de calidad
- Esperanza de vida de los materiales

METODOLOGÍA

- **MÉTODOS INDIRECTOS:**
 - Caracterización Petrofísica + Factores Ambientales
- **ENSAYOS EXPERIMENTALES:**
 - Ensayos de Durabilidad = Envejecimiento

DURABILIDAD: Métodos indirectos

CARACTERÍSTICAS PROPIAS DE LAS ROCAS

➤ PETROGRAFÍA

- Composición: mineral, química...
- Textura: modelo, fases de unión, tamaño...
- Espacios vacíos: cantidad, tamaño, forma...

➤ PROPIEDADES

- Químicas: solubilidad...
- Físicas: porosidad, permeabilidad...

⇒ CARACTERIZACION PETROFÍSICA

CARACTERÍSTICAS DEL AMBIENTE DE EXPOSICIÓN

➤ CLIMA

➤ CONTAMINACIÓN

➤ USO

PROPIEDADES DE LAS ROCAS → relacionadas con su durabilidad

Propiedades básicas

- *Densidad aparente o de la roca seca y porosidad abierta* (UNE-EN 1936:2007)
- *Porosimetría: tamaño de acceso de poro por intrusión de mercurio* (ASTM D4404-84)
- *Color: variaciones de color* (UNE-EN 15886:2011)

Propiedades hídricas

- *Contenido en agua en saturación (al vacío...)*
- *Absorción de agua por inmersión total, contenido en agua libre* (UNE-EN 13755:2008)
- *Grado de saturación* (coeficiente de Hirschwald)
- *Coeficiente de capilaridad* (UNE-EN 1925:1999; UNE-EN 15801:2011)
- *Evaporación, contenido en agua higroscópica* (UNE-EN 16322:2012; UNE-EN)
- *Permeabilidad al vapor de agua* (ASTM E-96-92; UNE-EN 15803:2010)
- *Coeficiente de hinchamiento* (ISRM 1977; RILEM 1980)

Propiedades mecánicas

- *Resistencia a la compresión* (UNE-EN 1926:2007)
- *Resistencia a la tracción (ensayo brasileño)*
- *Resistencia a la flexión* (UNE-EN 12372:2007; UNE-EN 13171:2008)
- *Módulo de elasticidad estático* (UNE-EN 14580:2006)
- *Energía de rotura o resistencia al choque* (UNE-EN 14158:2004)
- *Coeficiente de reblandecimiento*

Propiedades de superficie

- *Dureza Knoop o resistencia a la penetración* (UNE-EN 14205:2004)
- *Abrasión o resistencia al desgaste* (UNE-EN 14157:2005)

Propiedades térmicas

- *Coeficiente de dilatación térmica* (UNE-EN 14581:2006)
- *Resistencia al choque térmico*

Propiedades dinámicas

- *Velocidad de propagación de ondas* (UNE-EN 14579:2005)
- *Módulo de elasticidad dinámico* (UNE-EN 14146:2004)



DURABILIDAD: Ensayos experimentales

TIPOS DE ENSAYOS

➤ A TIEMPO REAL

- Exposición a la intemperie

➤ ACELERADOS → *Envejecimiento artificial acelerado: EEAA*

• Básicos:

- Ciclos termohídricos:
 - humedad–sequedad,
 - calentamiento–enfriamiento: choque térmico
- Ciclos de heladicidad
- Ciclos de cristalización de sales (Na_2SO_4)

• Atmósferas contaminadas:

- Niebla ácida (SO_2)
- Niebla salina (NaCl)
- Atmósferas controladas

• Otros ensayos:

- Ataque por soluciones ácidas
- Ataque por productos químicos
- Exposición a radiaciones ultravioletas
- Desmoronamiento
- Ensayos combinados



DURABILIDAD: Ensayos experimentales

ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO ARTIFICIAL ACELERADO

- **Métodos de ensayo de piedra natural**

Determinación de la resistencia a la **cristalización de sales** ► UNE-EN 12370:1999

Determinación de la resistencia a la **heladicidad** ► UNE-EN 12371:2011

Det. resistencia al envejecimiento por **acción de SO₂** en presencia de humedad ► UNE-EN 13919:2003

Determinación de la resistencia al envejecimiento por **niebla salina** ► UNE-EN 14147:2004

Determinación de la resistencia al envejecimiento por **choque térmico** ► UNE-EN 14066:2014

Det. de la sensibilidad a los cambios en apariencia producida por **ciclos térmicos** ► UNE-EN 16140:2011

- **Piedra aglomerada. Métodos de ensayo**

Determinación de la resistencia al **hielo y al deshielo** ► UNE-EN 14617-5:2012

Determinación de la resistencia al **choque térmico** ► UNE-EN 14617-6:2012

Determinación de la **resistencia química** ► UNE-EN 14617-10:2012

- **Productos de pizarra y piedra natural para tejados y revestimientos**

Métodos de ensayo ► UNE-EN 12326-2:2012

DURABILIDAD: Ensayos experimentales

ENSAYOS DE ENVEJECIMIENTO: Piedra natural

Material pétreo Ensayo	Pavimento exterior: 1/ baldosas, 2/ adoquines, 3/ bordillos	Placas para revestimientos murales	Plaquetas	Baldosas para pavimentos y escaleras	Tejados y revestimientos: pizarra y piedra natural
Norma	UNE-EN 1341/2/3	UNE-EN 1469	UNE-EN 12057	UNE-EN 12058	UNE-EN 12326-2
Resistencia al hielo	++	++	++	++	++
Cristalización de sales	++				
Envejecimiento por SO ₂	+	+			++
Envej. choque térmico	+	++	++	++	++
Envej. por niebla salina	++				

Ensayo	Granitos	Areniscas	Calizas	Mármoles	Serpentinas	Pizarras
Resistencia al hielo	+	+	+	+	+	+
Cristalización de sales		+	+			
Envejecimiento por SO ₂	+					+
Envej. choque térmico	+			+		+
Envej. por niebla salina						

DURABILIDAD: Ensayos experimentales

ETAPAS DE ENSAYO

→ aspectos comunes

TOMA DE MUESTRA

- PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS
- PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL
- VALORACIÓN DE RESULTADOS

DURABILIDAD: Ensayos experimentales

➤ PREPARACIÓN DE MUESTRAS

Características de las probetas

- MC: Normas CPC: Disponibilidad
- MC: Normas CPC: Homogeneidad
- Evaluación de los daños
- Dispersión de los resultados

▪ NÚMERO	→	3 a 5 probetas
▪ TAMAÑO	→	5 cm de lado
▪ FORMA	→	cubos
▪ ORIENTACIÓN	→	= ⊥

Elaboración de las probetas

- Preparar probetas en exceso: corte de sierra
- Revisar y limpiar las caras (Norma)
- Seleccionar las mejores
- Orientarlas y numerarlas
- Rotular algunas aristas o caras
- Examinar su superficie (Norma)
- Registro fotográfico o escaneado
- Determinar el “peso seco inicial” (Norma)



DURABILIDAD: Ensayos experimentales



Preparación de muestras

DURABILIDAD: Ensayos experimentales

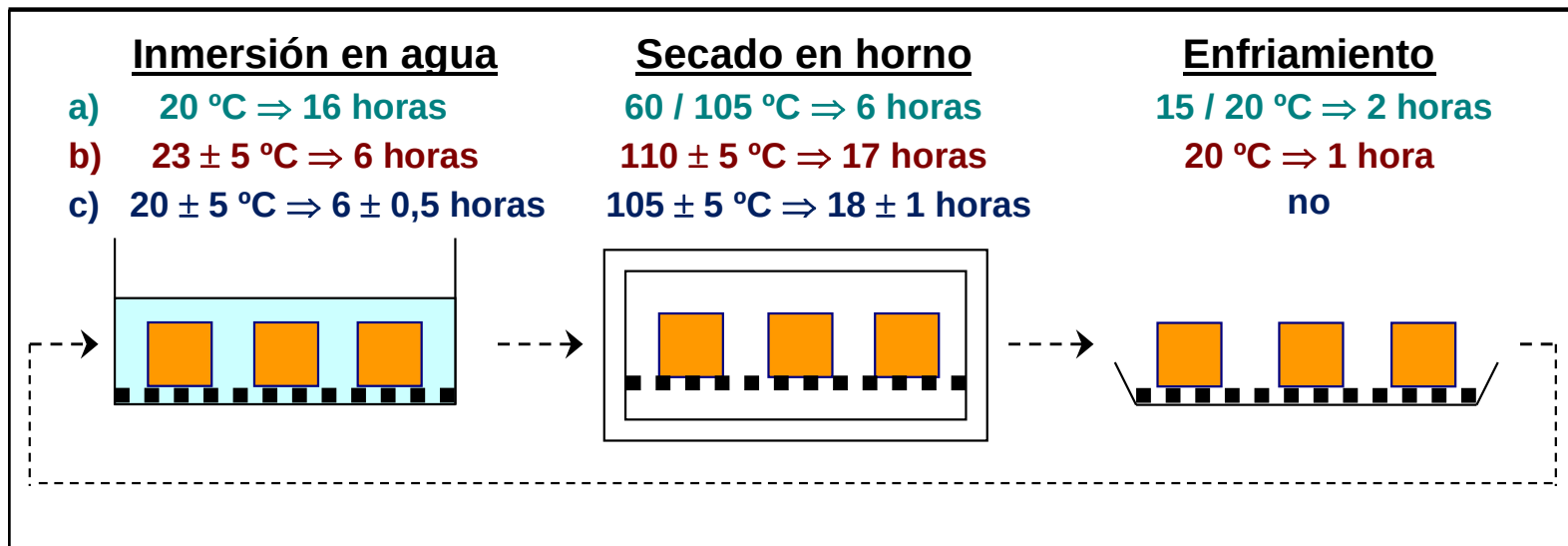
➤ PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

→ *aspectos comunes*

- **Normalizado** (RILEM, UNE-EN, ASTM...)
- **Selectivo** (agua, hielo, sales, SO₂...)
- **Acelerado**
- **Cíclico** (24 horas...)
- **Práctico**

ENSAYOS TERMOHÍDRICOS

- CICLO HUMEDAD–SEQUEDAD
 - a) Ensayo común
- CICLO TÉRMICO (calentamiento–enfriamiento)
 - b) **UNE-EN 12326-2** “pizarras y piedra natural para tejados”
- CHOQUE TÉRMICO
 - c) **UNE-EN 14066** “piedra natural” (placas, plaquetas, baldosas)
UNE-EN 16140 evaluación visual de los daños en superficie



- Agresividad baja → nº de ciclos elevado: a) >50 , b) 20, c) 20

ENSAYO DE HELADICIDAD

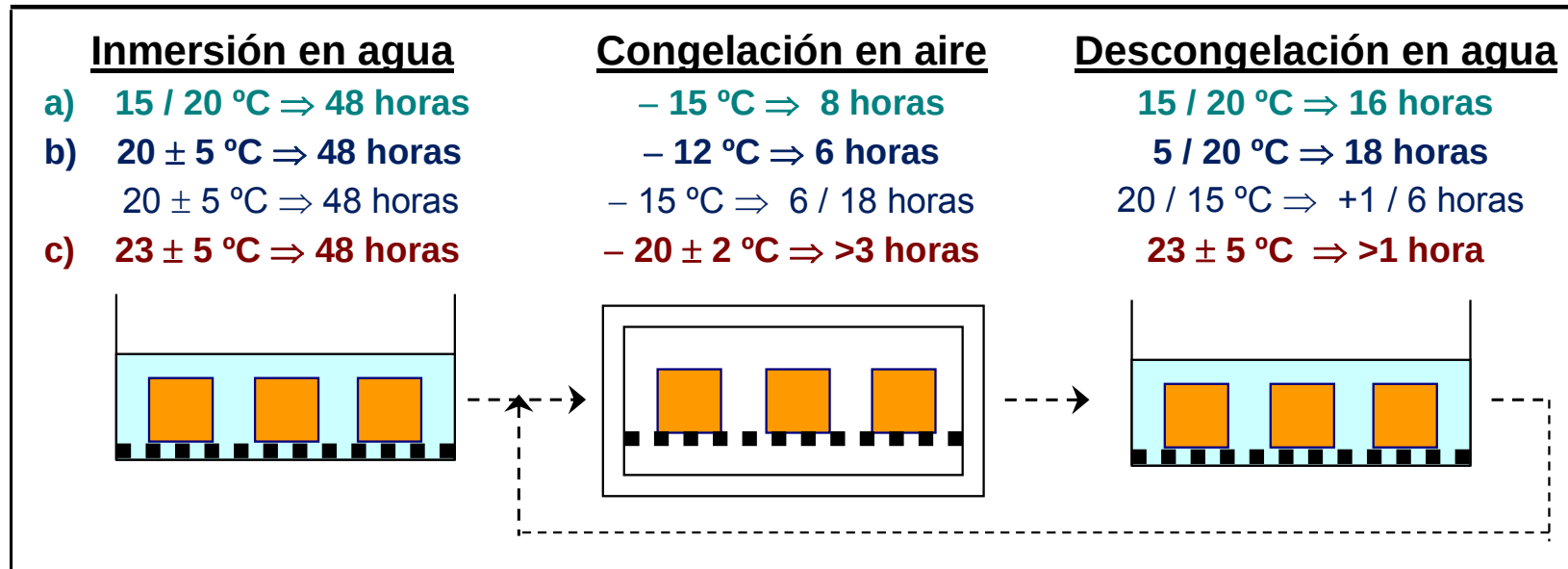
- CICLO HIELO-DESHIELO

- a) Ensayo común (manual)

- b) UNE-EN 12371 “piedra natural”

UNE-EN 77218 “silicocalcareos” / UNE 67028 “ladrillos”

- c) UNE-EN 12326-2 “pizarras y piedra natural para tejados”



- Agresividad media → nº de ciclos medio: a) ≈ 25, b) altera, 160, c) 100
(silicocalcáreos: 50, ladrillos: 25)

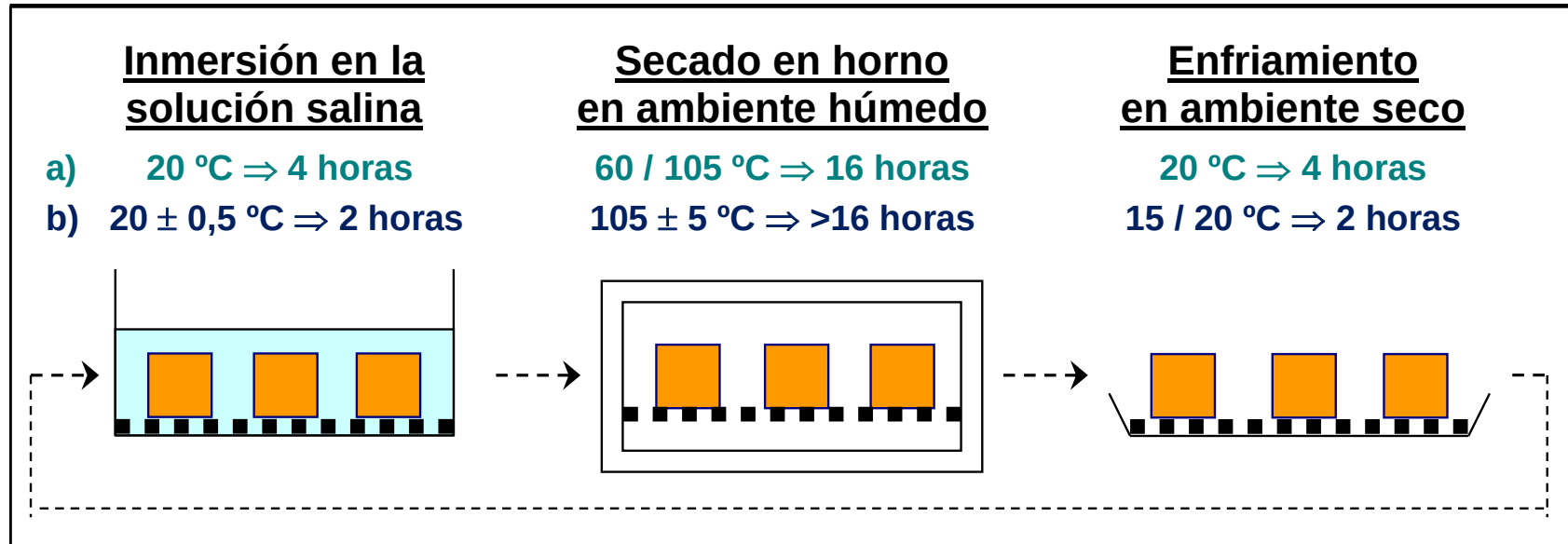
ENSAYO DE CRISTALIZACIÓN DE SALES

- CICLOS DE CRISTALIZACIÓN DE SALES

- a) Ensayo común

- b) UNE-EN 12370 “piedra natural”

PREPARACIÓN PREVIA $\Rightarrow$ solución salina: $\text{NaSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (14%)

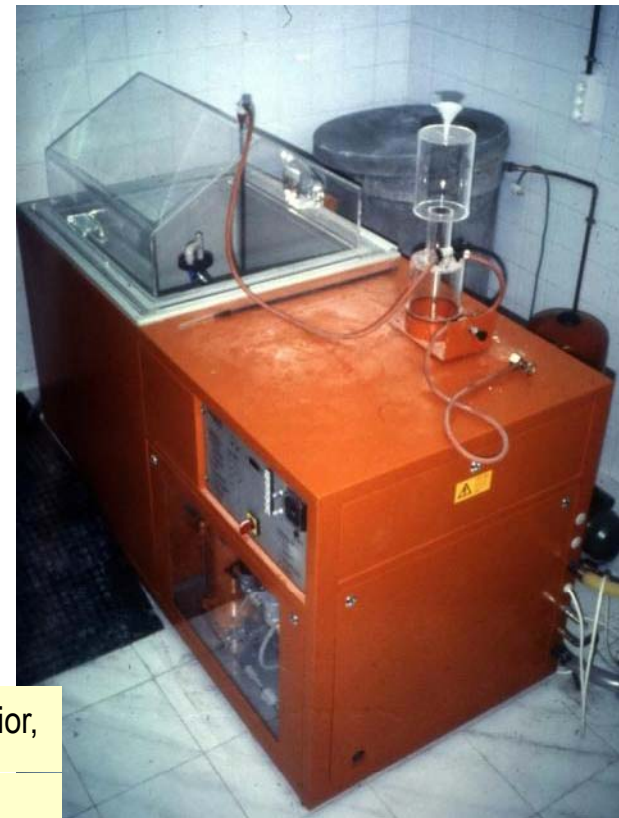


- Agresividad alta $\rightarrow$ n° de ciclos bajo: a) 10, b) 15

ENSAYO DE NIEBLA ÁCIDA

DIN 50018 “ataque con dióxido de azufre en atmósfera saturada en vapor de agua”

- **Cámara normalizada (Kesternich): 300 litros**
 - Depósito inferior con agua (2 l), con calefacción
 - Entrada para gases (SO_2), con registro
- **Ambiente contaminado: dos grados**
 - Bajo: 0,2 l de SO_2 por ciclo
 - Alto: 2,0 l de SO_2 por ciclo
- **Procedimiento experimental: clima alterno**
 - Ataque: 8 h con SO_2 en ambiente saturado (Hr: 100%, T: 40°C)
 - Secado: 16 h sin SO_2 en ambiente normal (Hr: 75%, T: 20°C)
- **Duración ensayo**
 - 1 o 2 semanas (ciclo: 24 horas)



Cámara para el ensayo de niebla ácida, cerrada en su parte inferior, con entrada de gases en su parte superior, junto al aparato para establecer los dos grados de contaminación en el ambiente.

ENSAYO DE NIEBLA ÁCIDA

- ACCION DE SO_2 EN PRESENCIA DE HUMEDAD

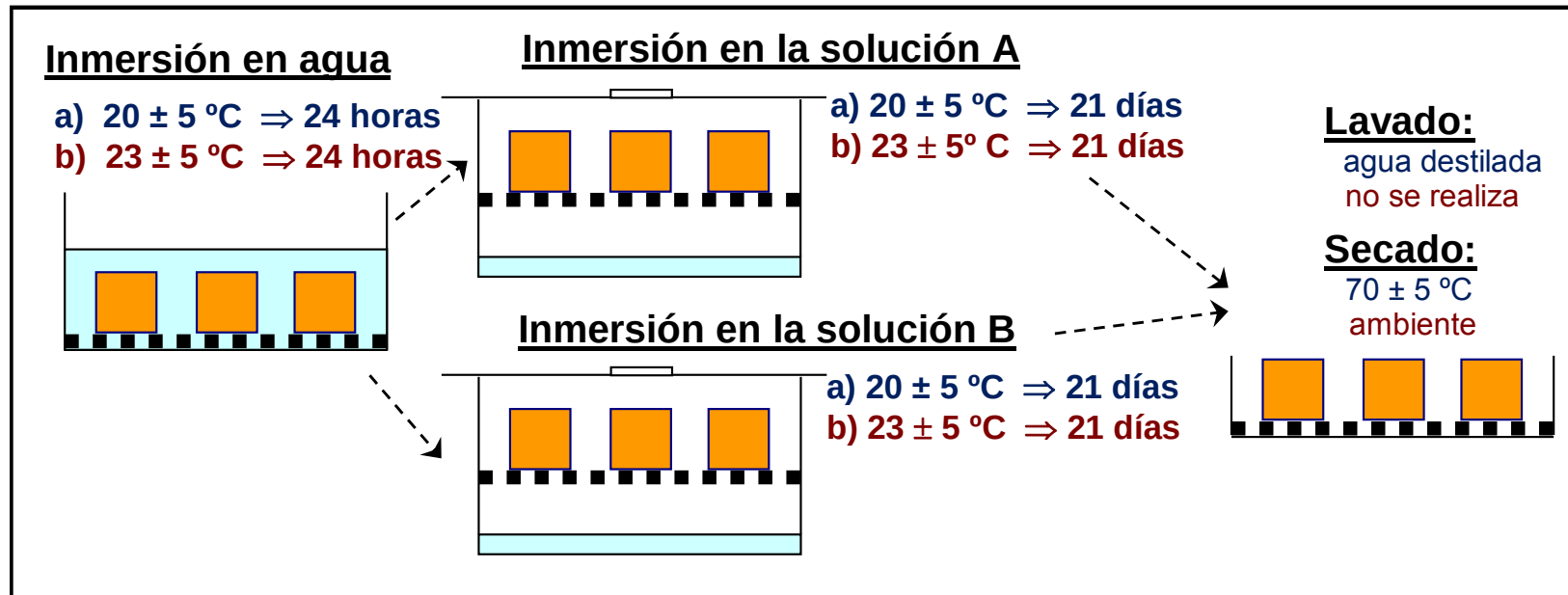
- a) UNE-EN 13919 “piedra natural”

PREPARACIÓN $\Rightarrow$ solución A: 500 ml H_2SO_3 en 150 ml agua destilada
solución B: 150 ml H_2SO_3 en 500 ml agua destilada

- b) UNE-EN 12326-2 “pizarras y piedra natural para tejados”

$\rightarrow$ pizarras con contenido en carbonatos $< 20\%$

PREPARACIÓN $\Rightarrow$ solución A: 600 ml H_2SO_3 en 180 ml agua destilada
solución B: 180 ml H_2SO_3 en 600 ml agua destilada



ENSAYO DE NIEBLA SALINA

ASTM B117; DIN 50021; UNE 60068-2-11(ensayo Ka) ← continuo
UNE-EN 14147 “piedra natural”; UNE 60068-2-52 (ensayo Kb) ← ciclos

- **Cámara normalizada** (control automático)
 - Recinto para muestras, cabeza nebulizadora
 - Depósito para la solución salina, compresor de aire
- **Niebla salina**
 - Solución salina: NaCl al 5% - **10%** en agua destilada
 - Aire comprimido para impulsar la sal (69 - 172 kN/m²)
- **Procedimiento: clima fijo / alterno**
 - Colocación de las muestra **secas ($70 \pm 5^{\circ}\text{C}$)** a 15-30° de la vertical
 - Temperatura constante 35°C, humedad 100%
 - Nebulización constante / alterna (niebla: 8 h - **4 h**, secado: 16 h - **8 h**)
 - Control de la cantidad, concentración de la niebla y pH (6,5 - 7,2)
- **Duración ensayo**
 - 16 horas a 4 semanas (UNE 60068-2-11)
 - **60 ciclos (ciclos de 12 horas). Eliminar la sal. Secar a $70 \pm 5^{\circ}\text{C}$**
 - 3 días (1 ciclo por día) a 56 días (8 ciclos por semana), (UNE 60068-2-52)

ENSAYO DE NIEBLA SALINA



Cámara para el ensayo de niebla salina, abierta en su parte inferior, con el pulverizador situado en su parte superior en posición central.



DURABILIDAD: Ensayos experimentales

➤ VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS

→ evaluación de los daños

- EXAMEN DE LA SUPERFICIE
- PÉRDIDA DE PESO DE LAS MUESTRAS
- VARIACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS

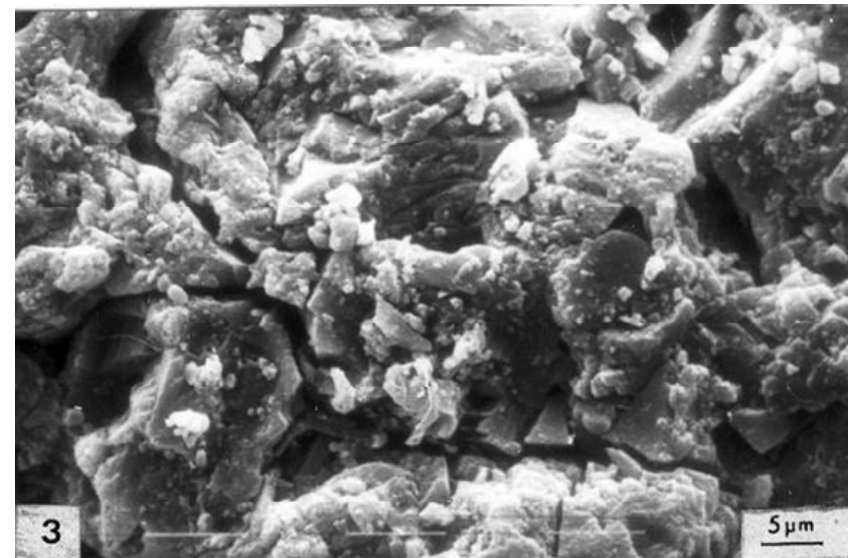
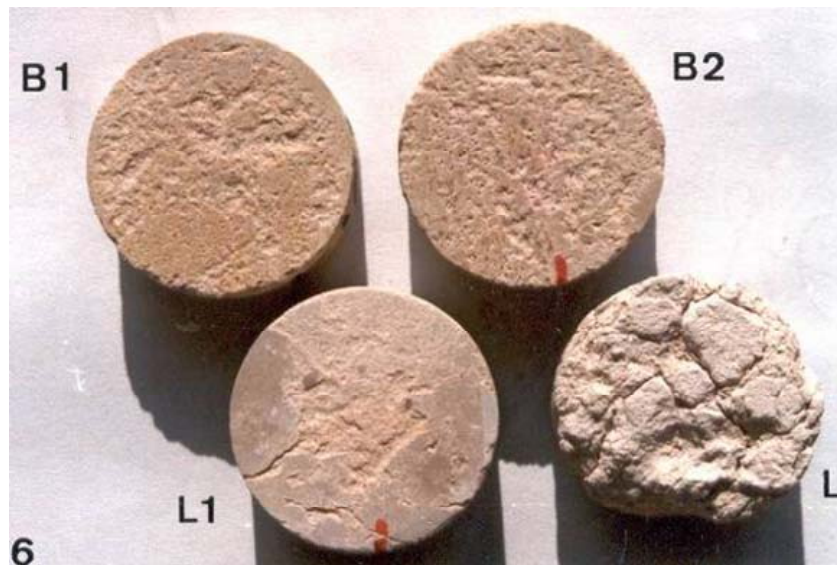
► Alonso F.J. et al. (2013). Durabilidad de granitos ornamentales: valoración de los daños inducidos por el ensayo de cristalización de sales. *Materiales de Construcción* 58, 191-201.

DURABILIDAD: Ensayos experimentales

➤ VALORACIÓN DE LOS RESULTADOS: evaluación de los daños

Examen de la superficie

- **Color** → cambio: general, selectivo
- **Aspecto** → daños: disgregación, fisuración
- **Rugosidad** → saltación, disolución...



► Grossi C.M. et al. (2007). *Color changes on building limestones surfaces*. Color Research and Application 32, 320-331.

EVALUACIÓN DE LOS DAÑOS: Examen de la superficie

Inspección visual (lupa – microscopio MEB)

- cambio de color o manchas: oxidación de minerales... (UNE-EN 15886)
- cambio de volumen: hinchamiento, deformación...
- creación o desarrollo de fisuras: microfisuración, agrietamiento...
- pérdida de material: exfoliación, disgregación...
- aporte de material: depósito, eflorescencia...

Escala de daños: Índice de deterioro (UNE-EN 12371)

- 0 = muestra intacta
- 1 = daños mínimos
- 2 = grietas o fragmentos pequeños ($<0,1$ mm; <10 mm²)
- 3 = grietas o fragmentos mayores
- 4 = muestras rota en 2 o con grandes grietas
- 5 = muestra rota en pedazos o desintegrada

Evaluación de oxidaciones (UNE-EN 16140)

- T1 = Sin oxidaciones (pérdida de brillo)
- T2 = Oxidación, sólo alrededor de los minerales
- T3 = Oxidación, con propagación de la decoloración

EVALUACIÓN DE LOS DAÑOS: Examen de la superficie

ENSAYO TERMOHÍDRICO

DAÑOS

- Pérdida de material (materiales con arcillas)
- Exfoliación, escamación, hinchamiento (en pizarras)
- Cambios de color: oxidación de Fe... (en granitos, pizarras)
- Señales de disolución (en calizas)
- Pérdida de resistencia

ENSAYO DE HELADICIDAD

DAÑOS

- Fisuración (en rocas cristalinas)
- Disgregación, exfoliación (en pizarras)
- Pérdida de resistencia

ENSAYO DE CRISTALIZACIÓN DE SALES

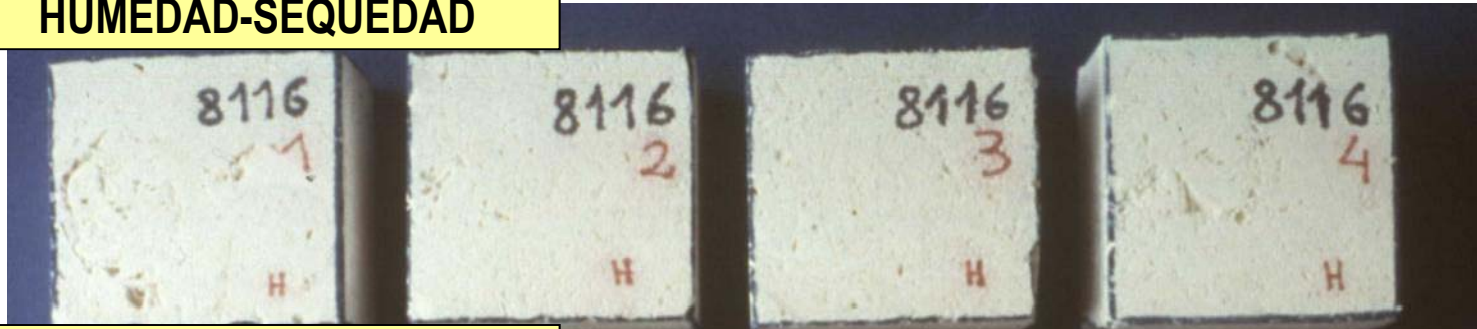
DAÑOS

- Procesos de disgregación (en rocas porosas)
 - . saltación de partículas: picado
 - . desmoronamiento

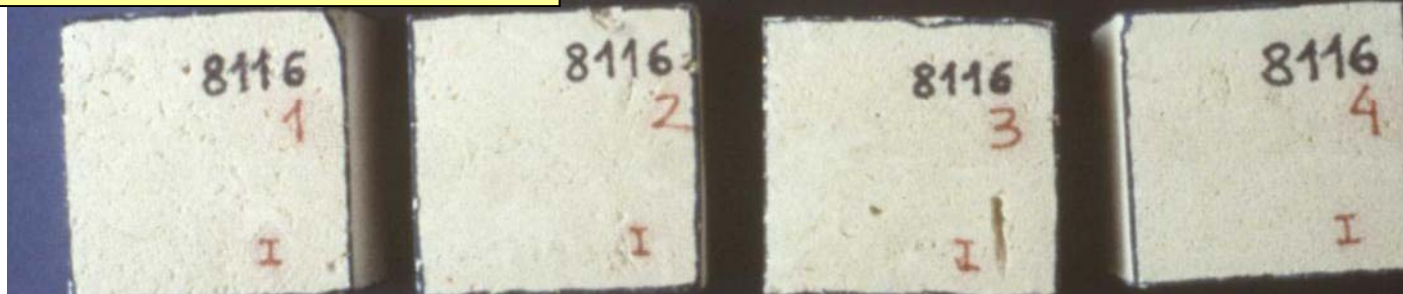
Examen de la superficie

Caliza de Hontoria

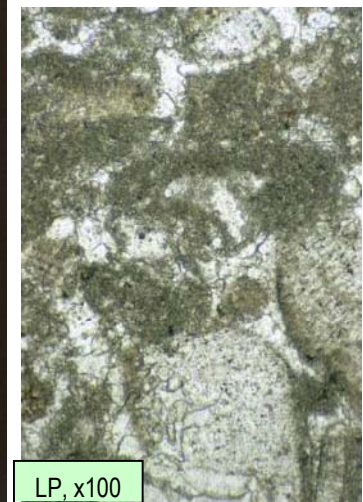
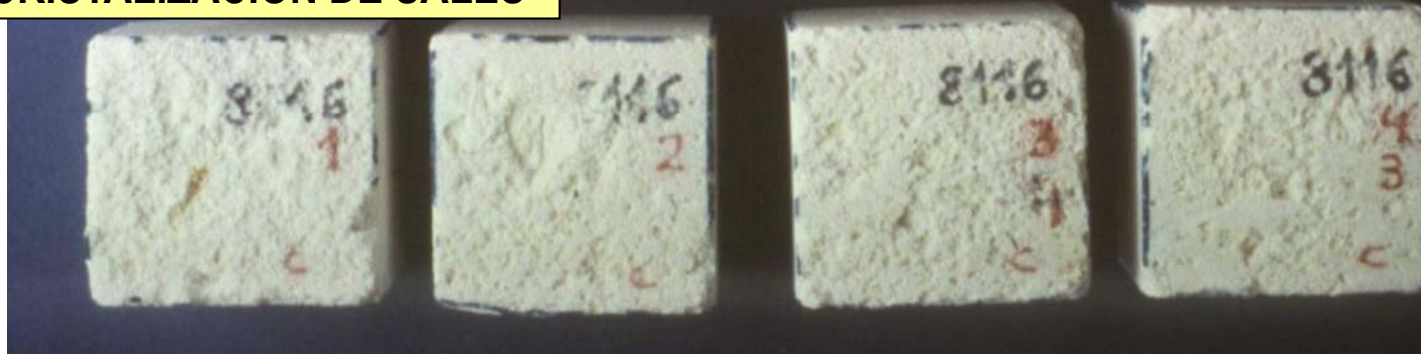
HUMEDAD-SEQUEDAD



HIELO-DESHIELO



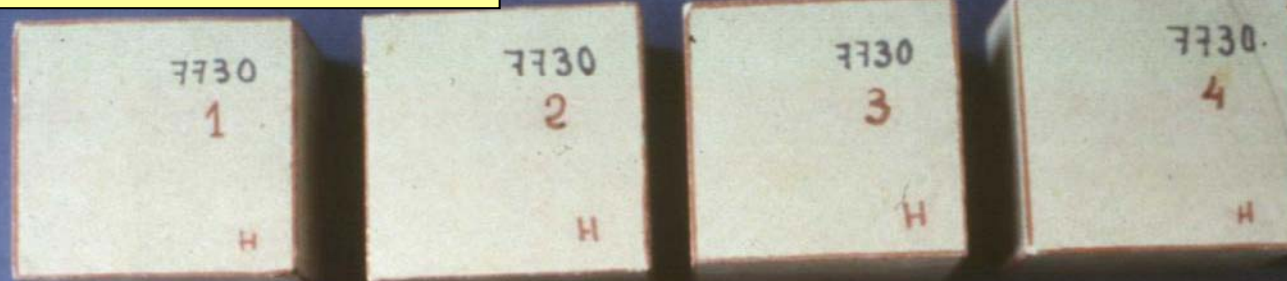
CRISTALIZACIÓN DE SALES



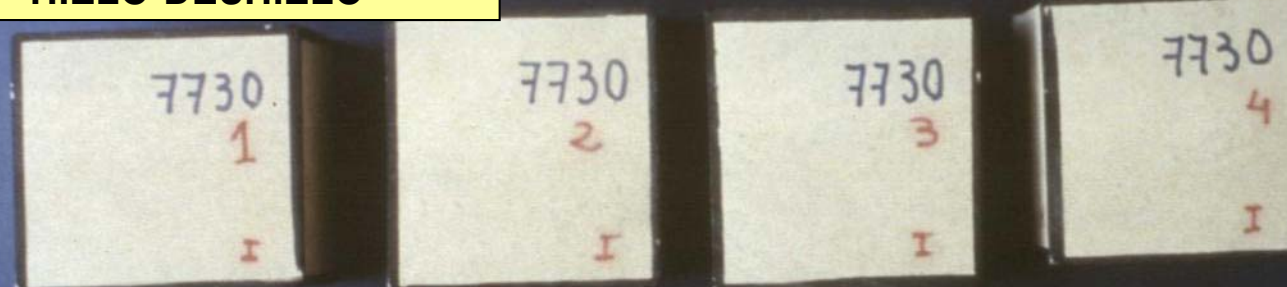
Examen de la superficie

Dolomía de Boñar

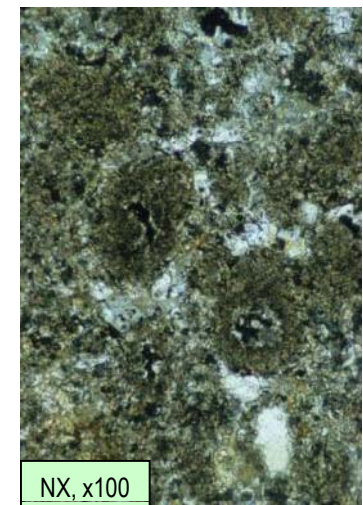
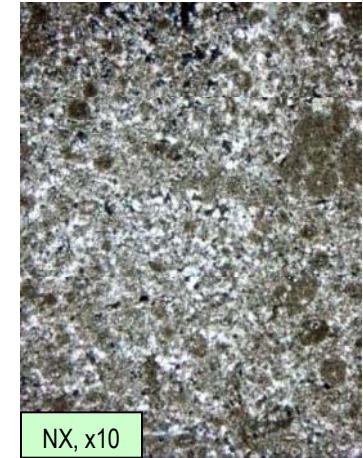
HUMEDAD-SEQUEDAD



HIELO-DESHIELO



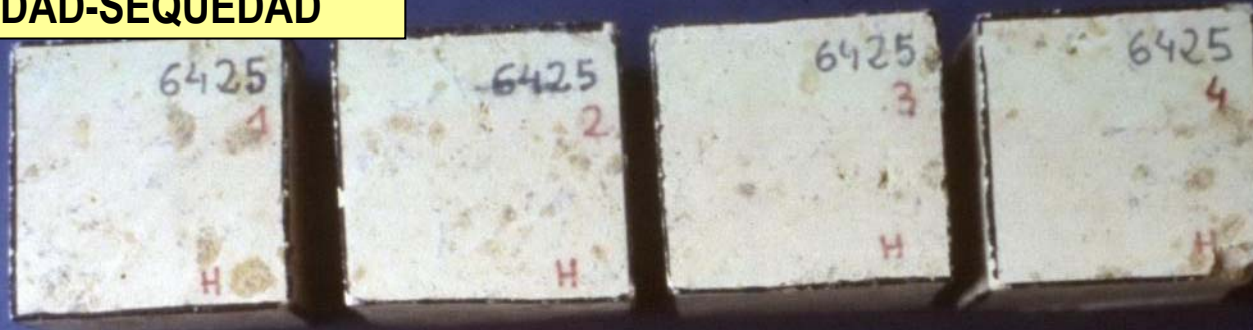
CRISTALIZACIÓN DE SALES



Examen de la superficie

Caliza del País (León)

HUMEDAD-SEQUEDAD



HIELO-DESHIELO



CRISTALIZACIÓN DE SALES



Examen de la superficie

Caliza de Sevilla

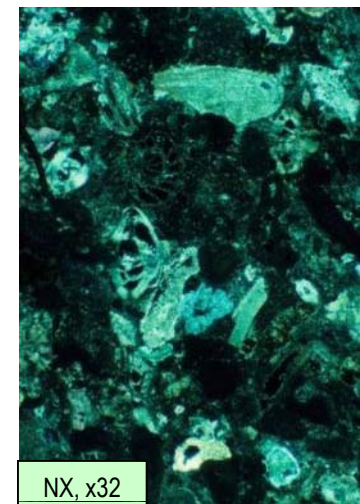
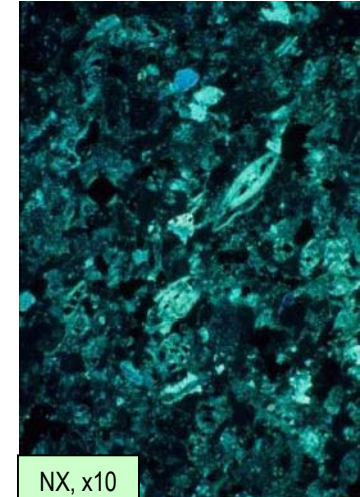
HUMEDAD-SEQUEDAD



HIELO-DESHIELO



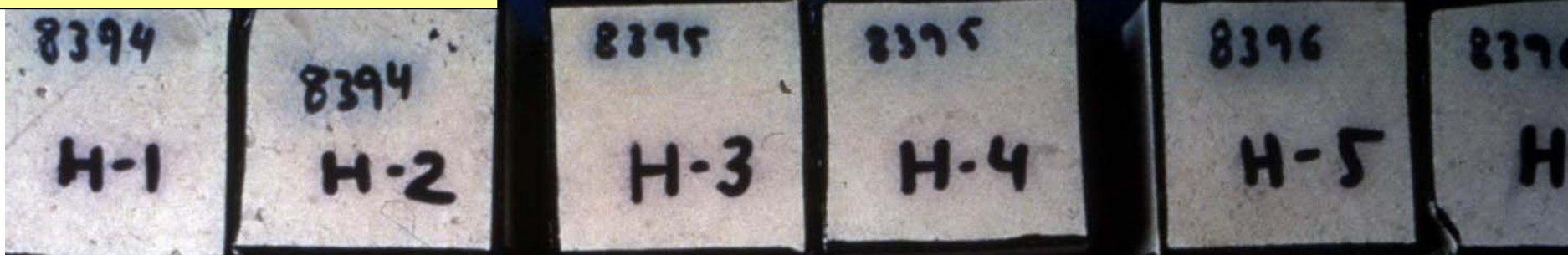
CRISTALIZACIÓN DE SALES



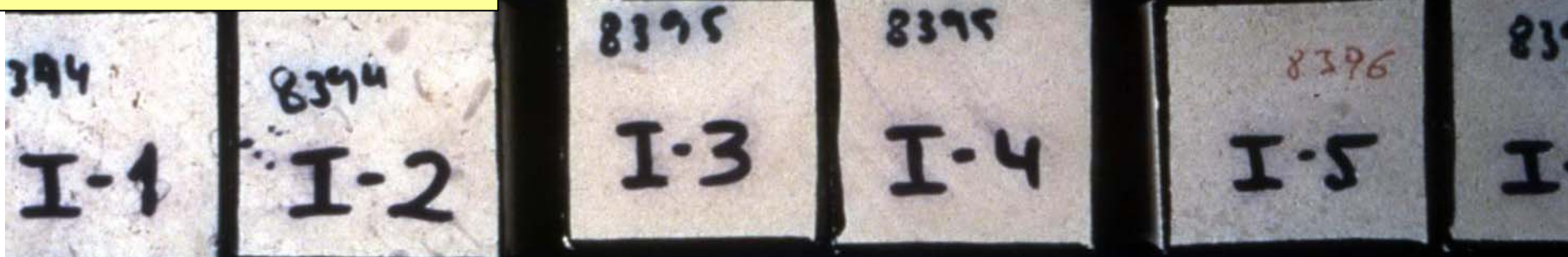
Examen de la superficie

Caliza de Gilena

HUMEDAD-SEQUEDAD



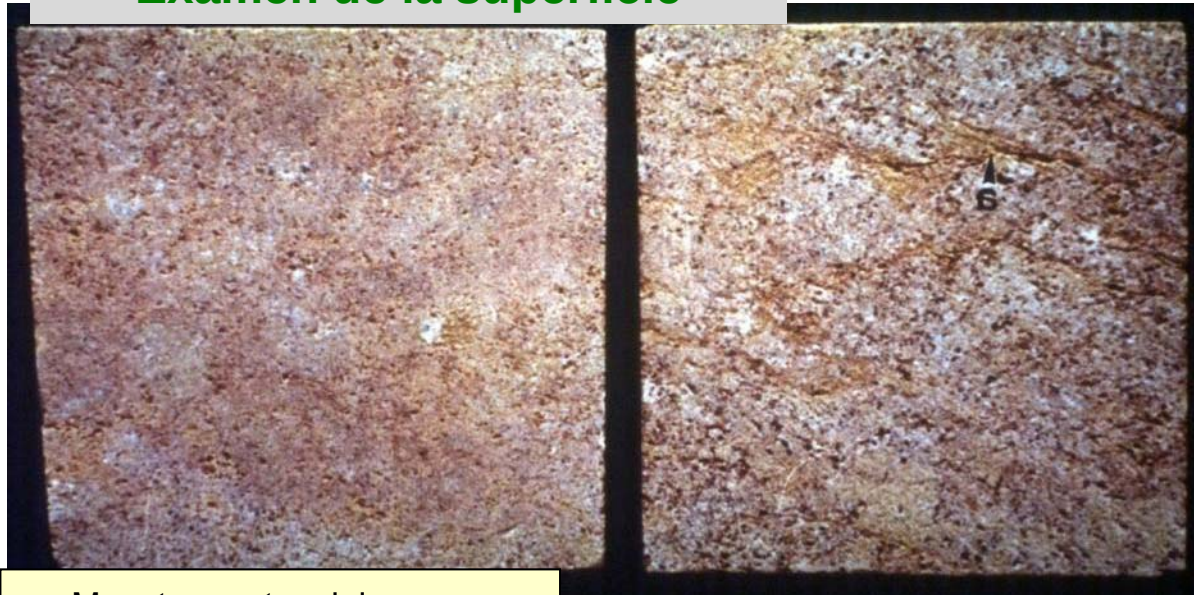
HIELO-DESHIELO



CRISTALIZACIÓN DE SALES



Examen de la superficie



Muestras antes del ensayo

Caliza de Piedramuelle

CRISTALIZACIÓN DE SALES

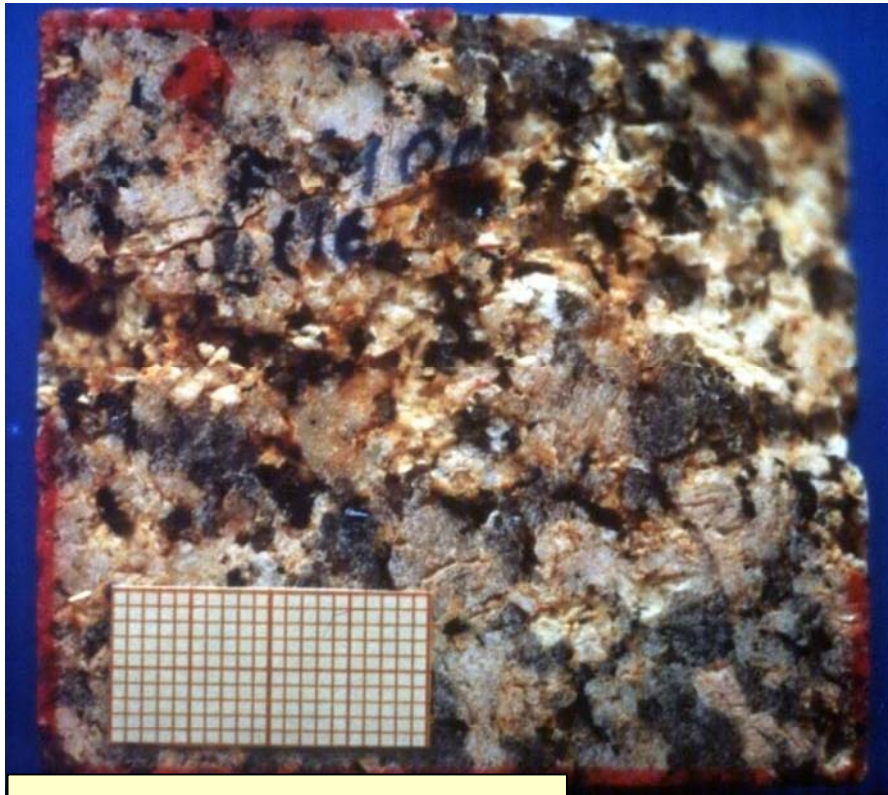


Muestras después del ensayo

Examen de la superficie

Granito de Axeitos

CRISTALIZACIÓN DE SALES



Muestras antes del ensayo

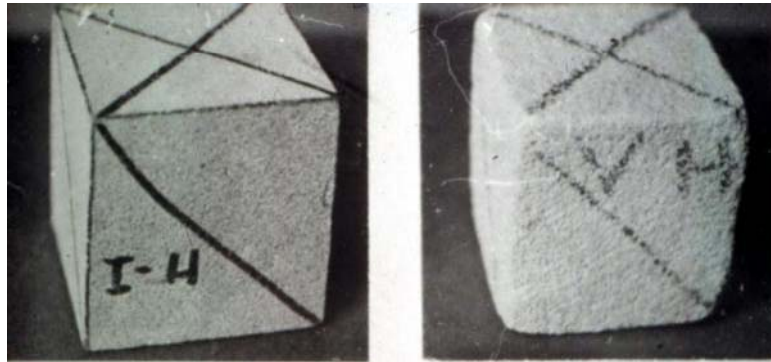


Muestras después del ensayo

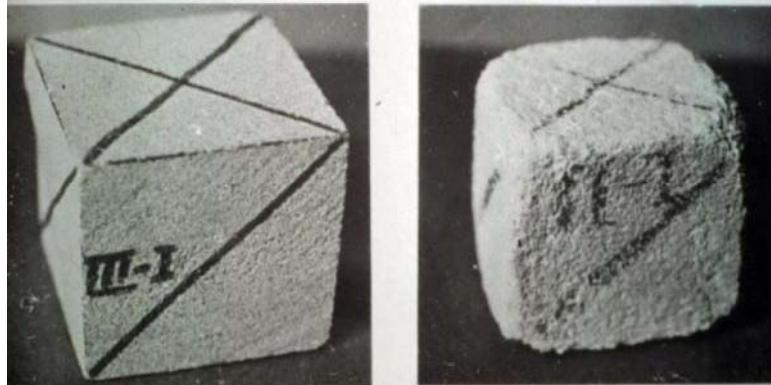
Examen de la superficie

Arenisca de Villaviciosa

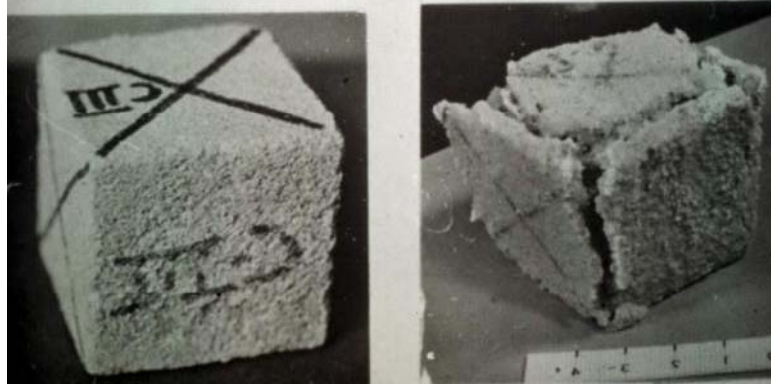
HUMEDAD-SEQUEDAD



HIELO-DESHIELO



CRISTALIZACIÓN DE SALES



Examen de la superficie

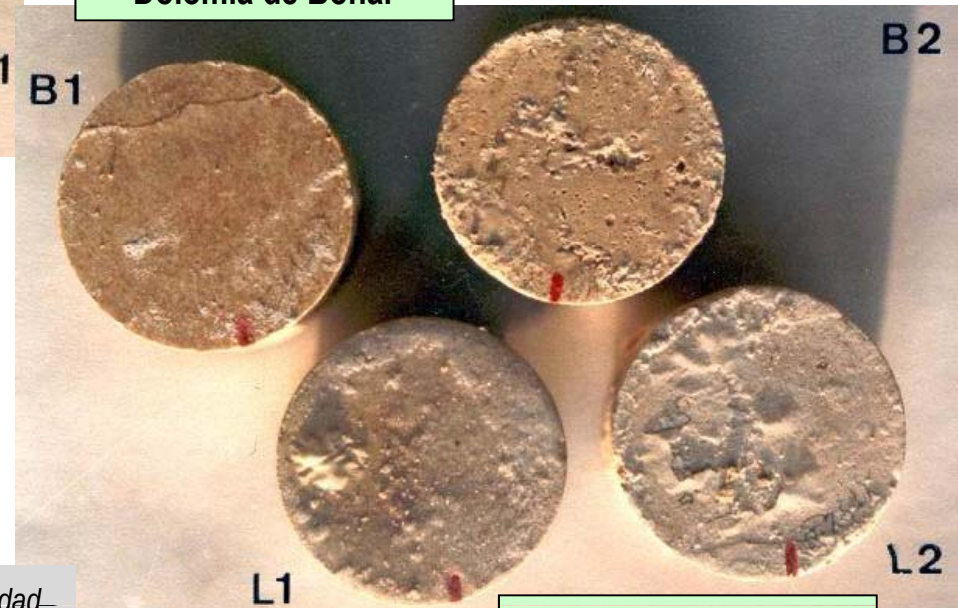
Caliza del Páramo



Caliza de Montaña

NIEBLA ÁCIDA

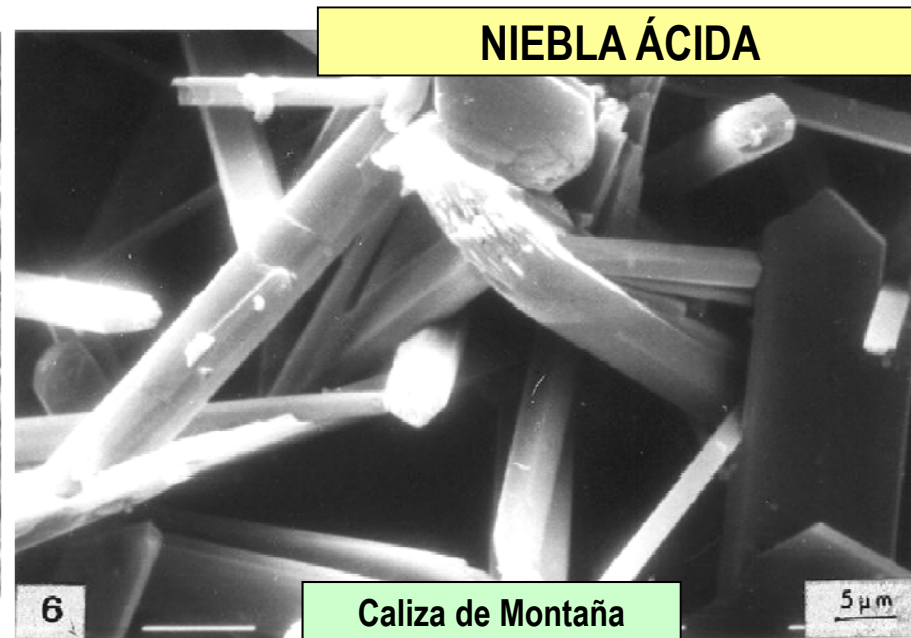
Dolomía de Boñar



Caliza del Laspra

► Fco. Javier Alonso (1986). *Caracterización petrofísica y alterabilidad de calizas y dolomías*. Tesis doctoral, Universidad de Oviedo. [en la red](#)

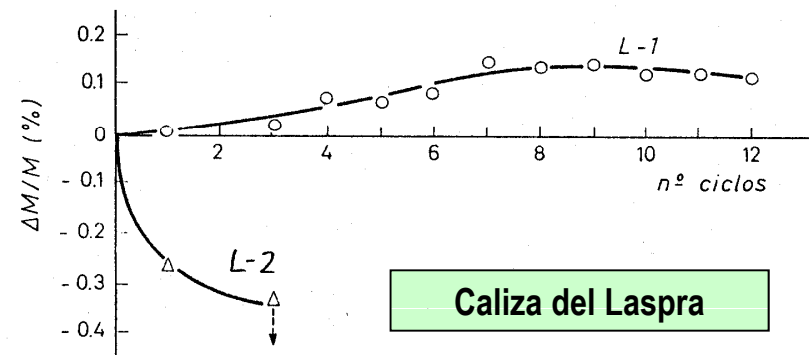
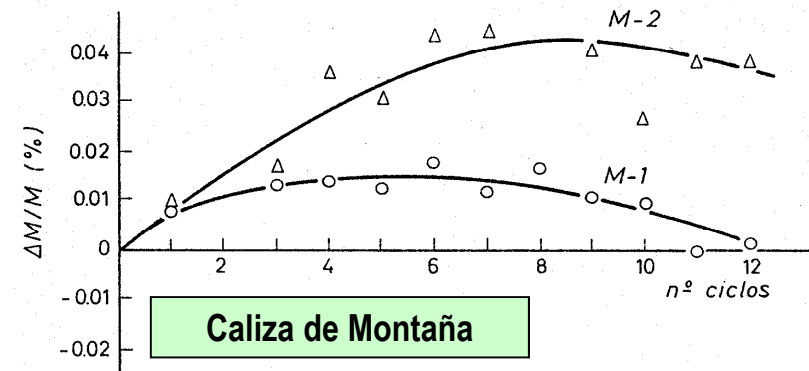
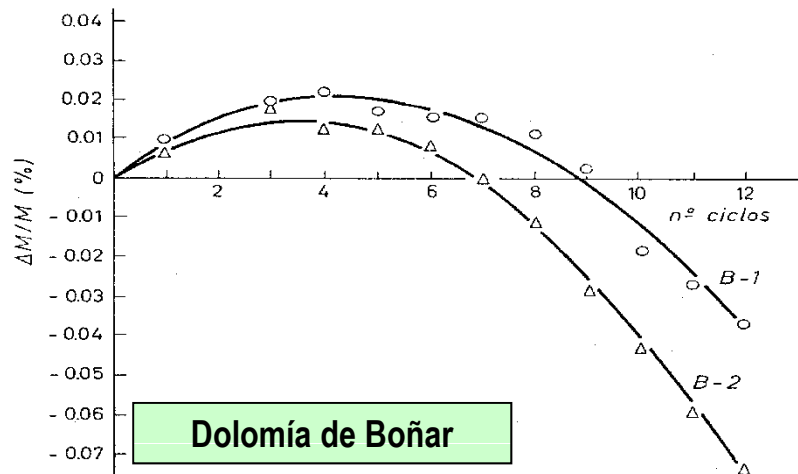
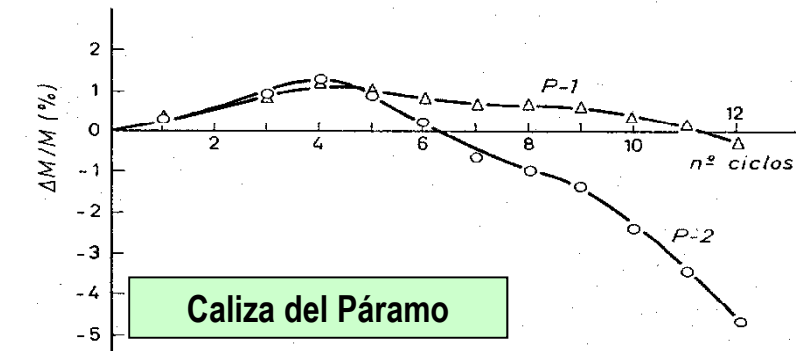
Examen de la superficie



DURABILIDAD: Ensayos experimentales

VALORACIÓN DE RESULTADOS: Pérdida de peso

$(\Delta M / M_0) \times 100 \longrightarrow f(\text{tipo de deterioro})$



DURABILIDAD: Ensayos experimentales

VALORACIÓN DE RESULTADOS: Variación de propiedades físicas

- porosidad, porosimetría
- hídricas: absorción, capilaridad, permeabilidad...
- mecánicas: dureza, resistencia...
- dinámicas: velocidad de propagación de ondas

DURABILIDAD: Ensayos experimentales

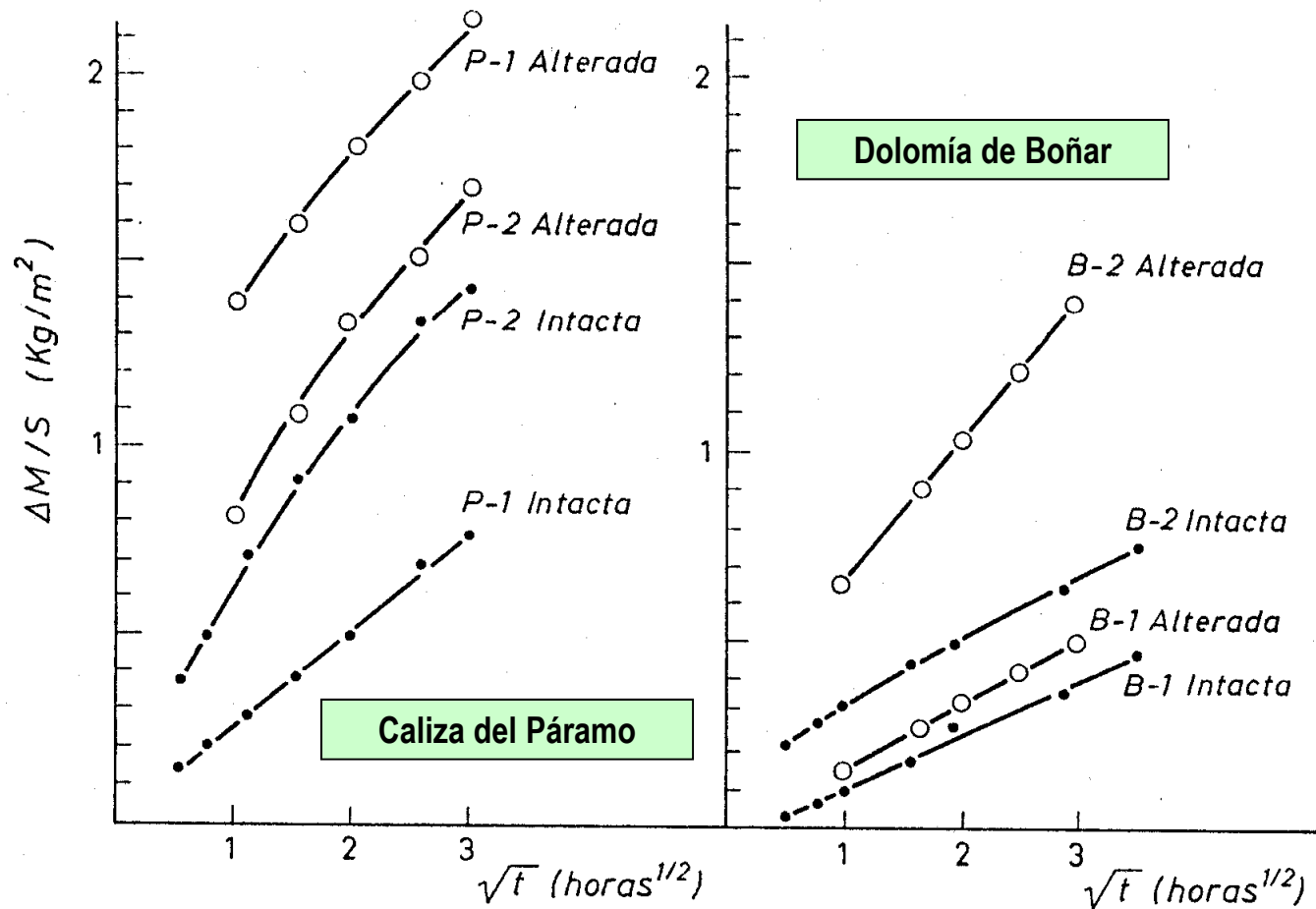
Variación de propiedades físicas

Ensayo	Variaciones de				
	Volumen aparente	Módulo de elasticidad dinámico	Módulo de rotura (flexión)	Resistencia compresión	Propiedades hídricas
Resistencia al hielo	X	X	X	X	
Cristalización de sales					
Envejecimiento por SO ₂					
Envejecimiento por choque térmico		X	X		
Envejecimiento por niebla salina					

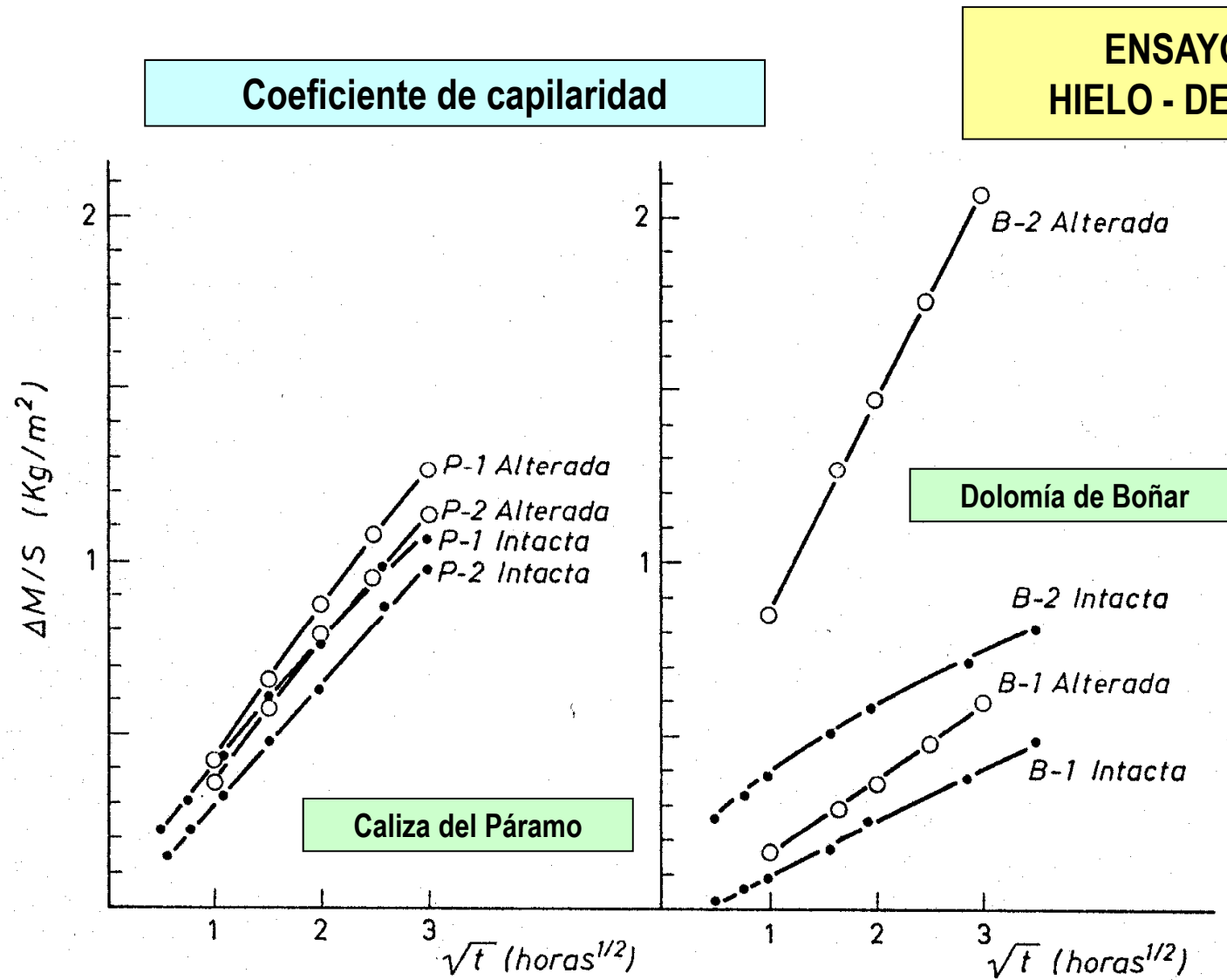
Variación de propiedades físicas

Coeficiente de capilaridad

ENSAYO DE HUMEDAD - SEQUEDAD



Variación de propiedades físicas



Variación de propiedades físicas

Resistencia a la tracción: pérdida de resistencia (%)

ENSAYO DE HUMEDAD - SEQUEDAD

35 %	20 %	20 %	10%
------	------	------	-----

ENSAYO DE HIELO - DESHIELO

26 %	25 %	20 %	30%
------	------	------	-----

ENSAYO DE CRISTALIZACIÓN DE SALES

0 %	0 %	0 %	0%
-----	-----	-----	----

Caliza del Páramo

Caliza de Montaña

Dolomía de Boñar

Caliza del Laspra



DURABILIDAD: Ensayos experimentales

LIMITACIONES

- Se requiere realizar varios ensayo
- No recogen todos los factores ambientales
- No recogen su intensidad y duración
- El tamaño de las probetas es pequeño
- No consideran la influencia de otros materiales

ASPECTOS POSITIVOS

- La calidad de los materiales se mantiene en todos los ensayos
- Mayor interés en términos relativos: permite comparar materiales
- Pueden adaptarse a diferentes ambientes

- **SUPONEN UNA APROXIMACIÓN A LA REALIDAD** ⇒ deben tomarse con precaución
- **REQUIEREN ESTAR NORMALIZADOS** ⇒ deben ser reproducibles

