

ALTERACIÓN, DURABILIDAD Y CONSERVACIÓN DE MATERIALES ROCOSOS

Tema 3. FACTORES INTERNOS

3.2. Propiedades físicas



FACTORES INTERNOS

- ⇒ *relativos a la naturaleza de los materiales*
- ⇒ *insuficiencias por baja calidad, defectos*
- ⇒ *pasivos frente a los agentes externos*

■ PETROGRAFÍA

- **Composición**
- **Textura / Espacios vacíos**

■ PROPIEDADES

- **Químicas**
- **Físicas**

► Esbert R.M. et al. (2008). *La petrofísica en la interpretación del deterioro y la conservación de la piedra de edificación*. Trabajos de Geología 28, 87-95.



FACTORES INTERNOS: Propiedades

■ Propiedades físicas

→ relación con la compacidad y coherencia de la roca

Propiedades básicas o elementales

- Color
- Densidad - Porosidad
- Porometría: porosimetría por inyección de Hg

Propiedades hídricas

- Contenido en agua en saturación $\Leftarrow$ Densidad - Porosidad
- Absorción, evaporación, capilaridad...
- Permeabilidad
- Hinchamiento = expansión hídrica

Propiedades mecánicas

- Resistencia a la compresión, tracción, anclajes...
- Resistencia al impacto, abrasión, deslizamiento...
- Dureza al rayado, penetración...

Propiedades dinámicas

- Velocidad de propagación de ondas...

Propiedades térmicas

- Expansión térmica...



COLOR

Concepto

El color es una característica subjetiva, sólo existe en el ojo y en el cerebro del observador, no es una característica propia de un objeto.

Los fotorreceptores del ojo humano son los conos de la retina, y existen distintos tipos → diferente sensibilidad al espectro luminoso.

Interés

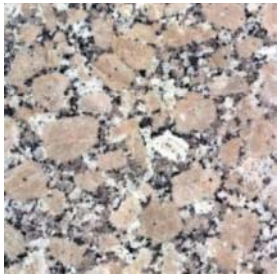
- Por ser de las primeras características percibidas
- Por su relación con la naturaleza y estado del material
- Por su influencia en el valor estético y económico
- Por su significado en el ámbito de la conservación:
 - en relación con la limpieza
 - en relación con el tratamiento

⇒ no sirve para determinar el tipo de material rocoso

COLOR

Factores:

- Percepción del observador (sistema visual)
- Fuente de iluminación: luz natural, artificial
- Características del objeto: naturaleza y condiciones
 - Naturaleza del material: características petrográficas
 - composición: minerales, sustancias colorantes
 - textura: tamaño de grano, distribución
 - porosidad: cantidad y tamaño de poro
 - Estado del material
 - grado de alteración
 - contenido en humedad
 - Acabado de la superficie
 - brillante: pulida
 - mate: cortada o serrada
 - mate: abujardada o apiconada
- Características del medio donde se propaga la luz



COLOR

El color de las rocas

- Homogeneidad del color (cambio en el espacio)
 - Color uniforme
 - rocas de grano fino o monominerálicas
 - patinado de la superficie → en edificios
 - Variación natural del color
 - rocas de grano muy grueso → conglomerado...
 - estructuras, elementos singulares → vetas, gabarros...
 - procesos de alteración → exterior, interior...
 - ⇒ en edificios: diferencias entre sillares o dentro de un sillar
- Evolución del color (cambio en el tiempo)
 - causa: ambiente (clima, contaminación)
 - efecto: decoloración, ennegrecimiento...
- Relación con las actuaciones de conservación
 - limpieza
 - tratamiento
 - ⇒ importa la homogeneidad y evolución del color



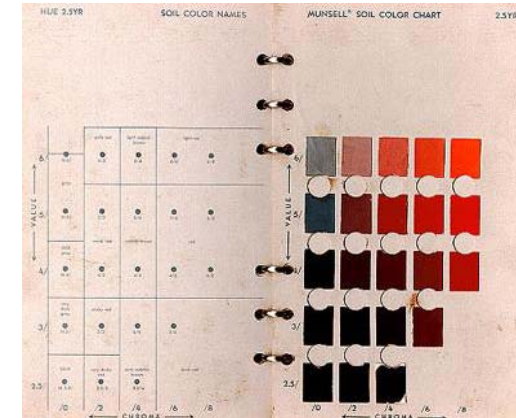
COLOR: Determinación

- **Cualitativa:**

→ adjetivos usuales de los tonos cromáticos:
amarillo, rojo, verde oscuro...

- **Semicuantitativa:** →

→ clave alfanumérica por comparación con patrones:
cartas de colores (Munsell Soil Color Chart...)



- **Cuantitativa:** →

→ parámetros numéricos obtenidos por equipos
instrumentales: colorímetros o espectrofotómetros.



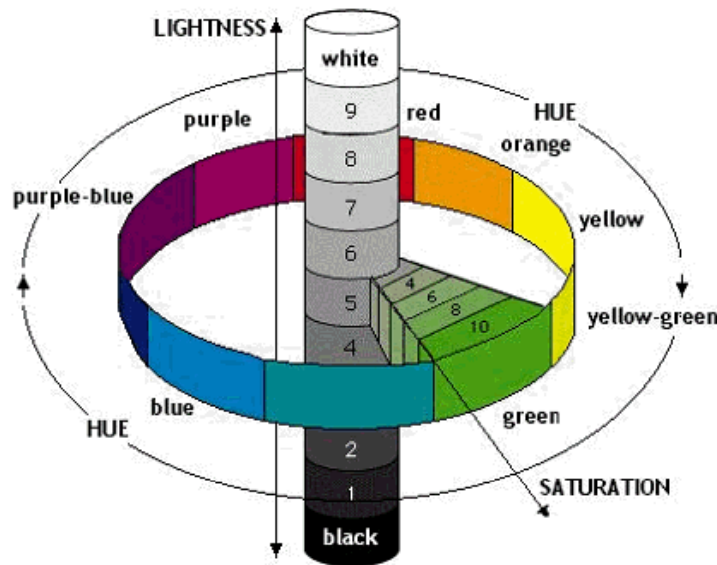
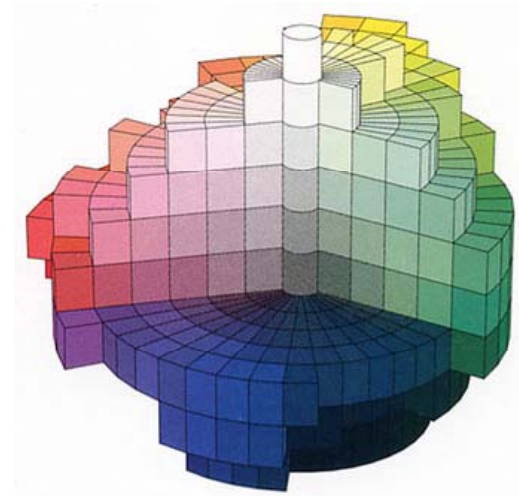
COLOR: Determinación

Sistema Munsell

Albert H. Munsell (1905)

esfera cromática →

Notación: 10 YR 7 / 4



Atributos del color:

- Tono o matiz (rojo, verde, amarillo...)
“hue”: 10 YR
- Claridad o luminosidad (refleja la luz)
“value o lightness”: 7
- Croma o pureza o grado de saturación (diferencia del gris) “chroma o saturation”: 4

COLOR: Determinación

■ Colorímetro

Mide el color a partir de sus valores triestímulo CIE.

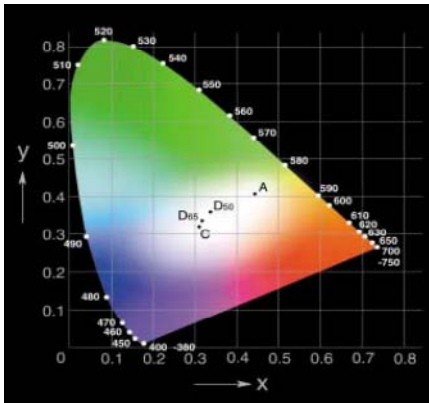
Utiliza tres filtros: rojo, verde y azul

- Valores triestímulo: cantidad de los 3 colores de referencia necesarios para igualar el color de un estímulo determinado:

- CIE 1931 (2°): X, Y, Z

- CIE 1964 (10°): X_{10} , Y_{10} , Z_{10}

Normalización CIE: Comisión Internationale l'Eclairage



■ Luz natural

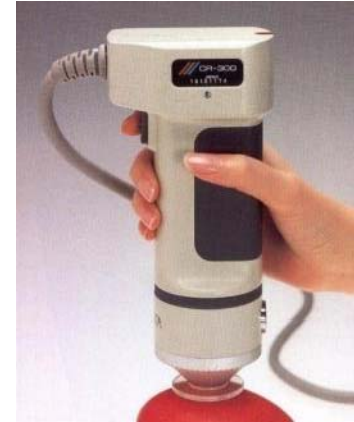


■ Iluminantes patrón CIE:

- A: lámpara de incandescencia de tungsteno
- C: luz diurna media
- D₆₅: luz diurna media con zona ultravioleta
- F₁ a F₁₂: diferentes lámparas fluorescentes

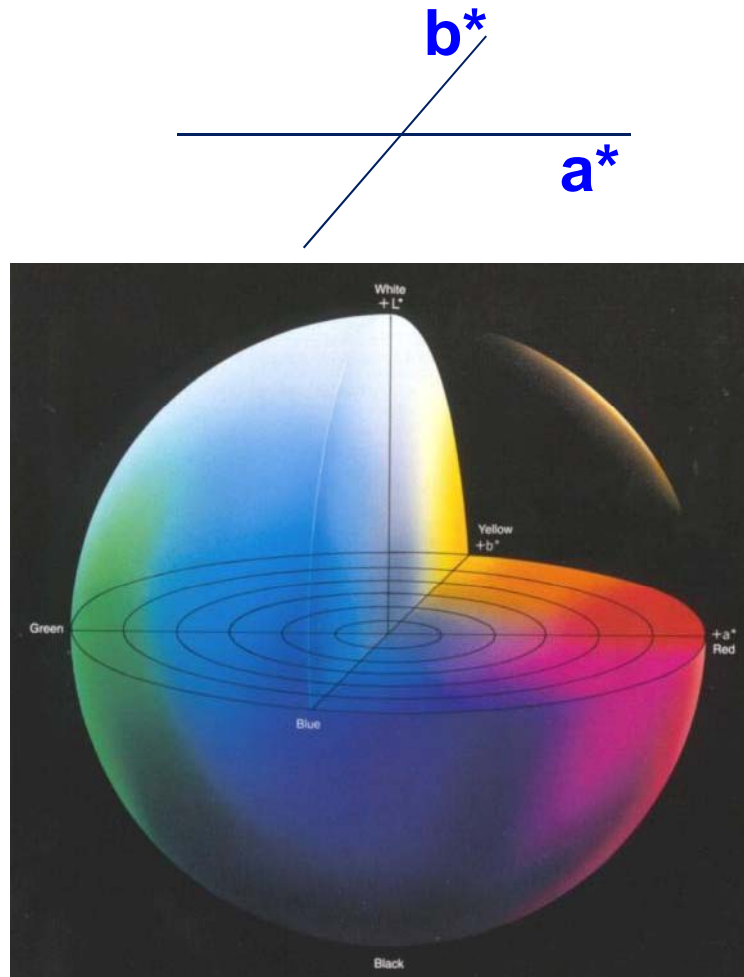
■ Espectrofotómetro

Mide la reflectancia / transmitancia espectral de un objeto para una o más longitudes de onda

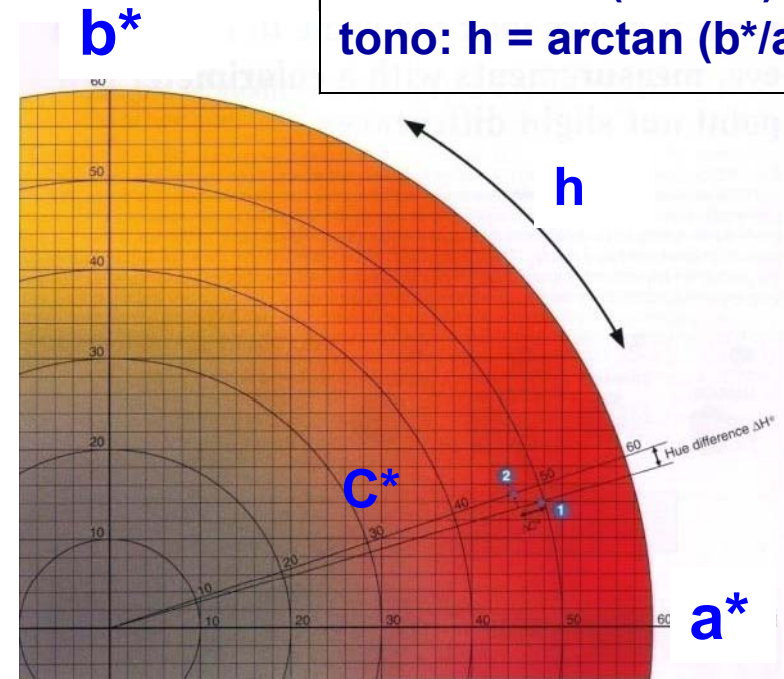


COLOR: Determinación

Espacio de color CIELAB (L^* a^* b^*) 1976



L^*



croma: $C^* = (a^2 + b^2)^{1/2}$
tono: $h = \arctan (b^*/a^*)$

L^* = claridad

— 100 (negro)

+ 100 (blanco)

a^* y b^* = tono y croma

a^* : — 60 (verde)

+ 60 (rojo)

b^* : — 60 (azul)

+ 60 (amarillo)



COLOR: Normas de ensayo

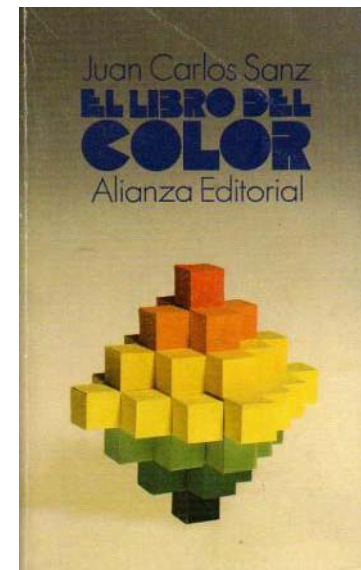
UNE 48-073-1/2/3 (1994/2003). Pinturas y barnices.
Colorimetría. Parte 1: Principios. Parte 2: Medida del color.
Parte 3: Diferencias de color

UNE-EN ISO 10546-16 (1999/2001). Baldosas cerámicas.
Determinación de pequeñas diferencias de color.

UNE-EN 15886 (2011). Conservación del Patrimonio Cultural. Métodos de ensayo. Medición del color de superficies, 12 p.

- Términos y definiciones
- Equipo de ensayo
- Medición del color de las probetas
- Medición del color de objetos interiores y exteriores
- Método de ensayo
- Cálculos e interpretación de los resultados
- Informe del ensayo

► Juan Carlos Sanz (1993). *El libro del color*. Alianza Editorial, Madrid, 216 p.



COLOR: Ejemplos

Aspecto macroscópico: simple vista

Arenisca de Villaviciosa (AV)



Caliza de Fraga (CF)



Dolomía de Boñar (DB)



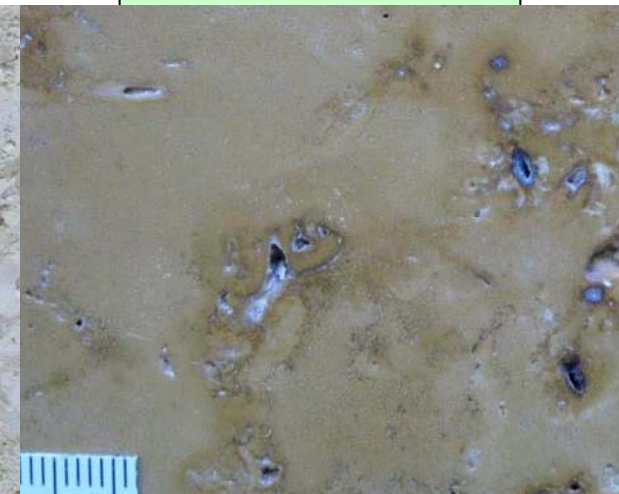
Arenisca de Uncastillo (AU)



Caliza de Santa Pudia (SP)



Travertino de Albox (TA)



COLOR: Ejemplos

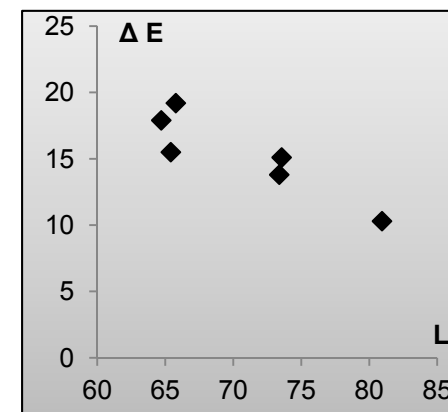
Resultados

Caracterización del color de las muestras secas

Roca	Adjetivo	Valor Munsell	Parámetros cromáticos CIELAB y CIELCH				
			L*	a*	b*	C*	h*
AV	marrón muy claro	10YR 7/2	66,1 ± 0,4	1,91 ± 0,08	10,5 ± 0,2	10,7 ± 0,2	79,7 ± 0,6
AU	marrón medio	10YR 6/3	60,4 ± 1,3	2,16 ± 0,11	16,2 ± 0,2	16,4 ± 0,2	82,4 ± 0,3
CF	blanco grisáceo	10YR 8/1	73,6 ± 0,4	2,01 ± 0,08	10,2 ± 0,1	10,4 ± 0,1	78,9 ± 0,3
SP	blanco amarillento	2,5Y 9/3	81,9 ± 0,7	1,67 ± 0,47	16,6 ± 0,8	16,7 ± 0,8	84,3 ± 1,4
DB	ocre muy claro	10YR 8/2	73,4 ± 0,4	2,03 ± 0,15	12,9 ± 1,0	13,0 ± 1,0	81,1 ± 0,3
TA	ocre claro	10YR 8/3	70,3 ± 2,4	5,23 ± 0,40	17,7 ± 0,4	18,5 ± 0,3	73,6 ± 1,3

Variaciones de color entre muestras secas y húmedas

Roca	Variación parámetros cromáticos					
	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	Δh^*	ΔE
AV	-18,9	1,5	3,3	3,6	-3,5	19,2
AU	-17,8	1,4	2,1	2,3	-3,6	17,9
CF	-14,9	1,0	2,3	2,5	-2,6	15,1
SP	-8,5	1,3	5,6	5,7	-1,2	10,3
DB	-12,2	2,0	6,2	6,5	-2,6	13,8
TA	-11,0	4,0	10,1	10,8	-0,7	15,5



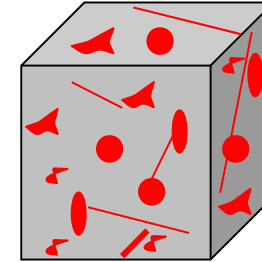
Relación entre la luminosidad de las rocas (L*) y el cambio de color que sufren con la humedad (ΔE)



DENSIDAD Y POROSIDAD

➤ DENSIDAD: $\rho = M / V$ [kg / m³]

- ◆ Densidad real / de los granos minerales: $\rho_s = M_o / V_s$
- ◆ Densidad aparente / de la roca seca: $\rho_d = M_o / V_t$
- ◆ Densidad de la roca húmeda: $\rho_w = M_o + M_w / V_t$



$$\Rightarrow \rho_s \geq \rho_w \geq \rho_d$$

➤ POROSIDAD: $p = (V_v / V_t) \cdot 100$ [%]

- ◆ Porosidad total: $p = (V_v / V_t) \cdot 100$
- ◆ Porosidad abierta: $p_o = (V_a / V_t) \cdot 100$
- ◆ Porosidad eficaz: $p_e = (V_e / V_t) \cdot 100$

$$\Rightarrow p \geq p_o \geq p_e$$

► Alonso F.J. (2010). *La porosidad como propiedad física: Densidad y porosidad*. Documento interno, Dpto. Geología. Univ. Oviedo, 4 p.

► Alonso F.J. (2010). *Ficha: Propiedades físicas de rocas (hojas para toma de datos y hoja de cálculo)*. Documento interno, Dpto. Geología. Univ. Oviedo, 14 p.

$$p = ((\rho_s - \rho_d) / \rho_s) \cdot 100$$



DENSIDAD REAL

DENSIDAD DE LOS GRANOS MINERALES

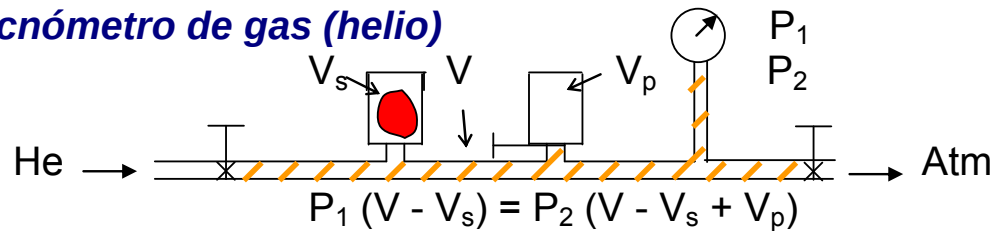
$$\rho_s = M_o / V_s$$

- Picnómetro de líquidos (agua)**

$$M_{\text{agua}} + M_o - M_{\text{muestra}} = M_{\text{agua}} \rightarrow V_s \quad (\rho_{\text{agua}} = 1)$$



- Picnómetro de gas (helio)**



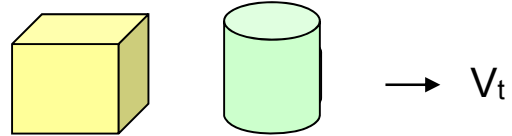
- Teórica: a partir de la densidad de los minerales**

$$\rho_s = \Sigma \rho_i \cdot c_i / 100$$

DENSIDAD APARENTE DENSIDAD DE LA ROCA SECA

$$\rho_d = M_o / V_t$$

- *Método geométrico*



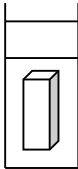
- *Método hidrostrático (principio de Arquímedes)*

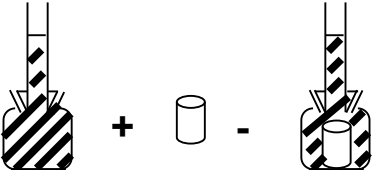
$$[M_o + M_{\text{agua}}] - [M_o - (V_{\text{sol}} \cdot \rho_{\text{agua}})] \rightarrow V_t$$



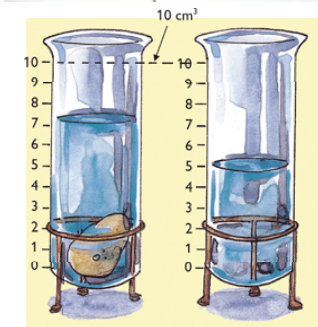



- *Desplazamiento en fluidos*

- agua  $\rightarrow V_t$

- mercurio  $\rightarrow V_t$

- semifluido  $\rightarrow V_t$



POROSIDAD ABIERTA

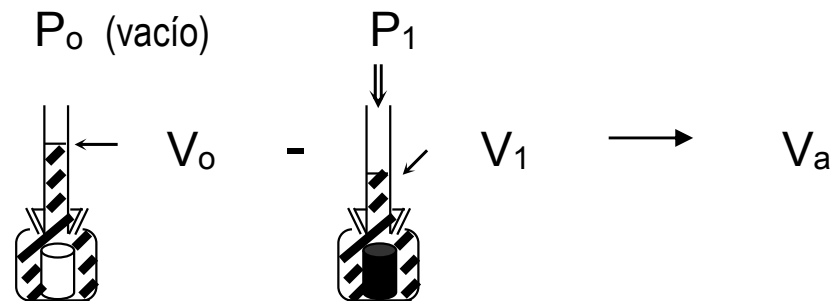
$$p_o = (V_a / V_t) \cdot 100$$

- *Método hidrostático*

$$[M_o + M_{\text{agua}}] - [M_o] = M_{\text{agua}} \longrightarrow V_a \quad (\rho_{\text{agua}} = 1)$$



- *Inyección de mercurio (al vacío)*



POROSIDAD TOTAL

$$p = (V_v / V_t) \cdot 100$$

- ***Teórica: a partir de ambas densidades***

$$\rho_d = (1 - p / 100) \cdot \rho_s$$

$$p = ((\rho_s - \rho_d) / \rho_s) \cdot 100$$

- ***Métodos ópticos: Observación directa y contaje***

Práctica 7. Determinación de propiedades físicas: Densidad y porosidad



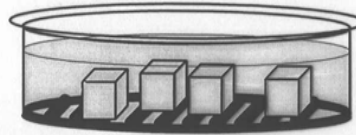
POROSIDAD EFICAZ

EJEMPLO: Agua absorbida a presión atmosférica en un tiempo dado

- Inmersión total en agua (UNE-EN 13755: 2008; NORMAL 7/81)

Ensayo:

- Determinar el peso seco: M_0
 - Inmersión total en agua destilada
- Determinar peso: $M(t)$
 - Duración: 2, 8, 30 días, $M(t) = \text{cte}$



→ *Determinar:*

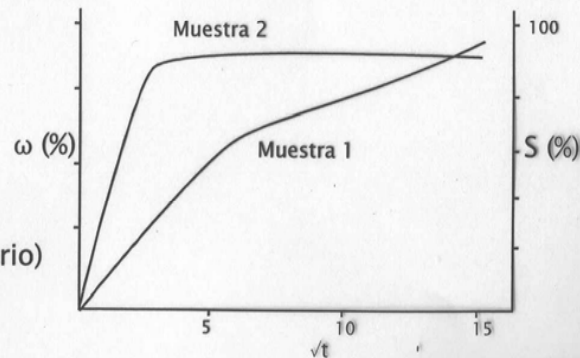
$$\omega(t) = \frac{M(t) - M_0}{M_0} \times 100$$

$$S(t) = \frac{\omega(t)}{\omega_s} \times 100$$

→ *Obtener:*

- Curvas de absorción libre de agua
- Parámetros

Contenido en agua	Para 2 días
Grado de saturación	Al final (en equilibrio)



$$p_e = (V_e / V_t) \cdot 100$$

Contenido en agua (w):

$$w_e = \frac{M_e - M_0}{M_0} \times 100$$

Porosidad eficaz (p_e):

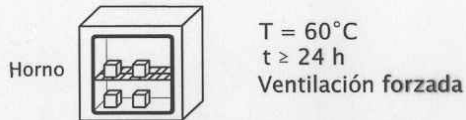
$$p_e = \frac{M_e - M_0}{M_s - M_h} \times 100$$

DENSIDAD – POROSIDAD = absorción de agua forzada (al vacío)

➤ Método de la pesada hidrostática (UNE-EN 1936:2007; RILEM 1980)

--- Densidad de la roca seca // --- Porosidad abierta // --- Contenido en agua en saturación

• Secado:



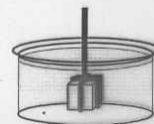
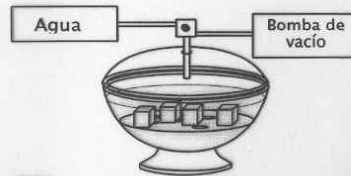
→ Determinar peso seco: M_0

• Saturación al vacío

- 24 h vacío seco
- 24 horas vacío en agua
- 24 horas sin vacío en agua

→ Determinar peso saturado: M_s

→ Determinar peso sumergida en agua (peso hidrostático): M_h



Parámetros:

- Densidad de la roca seca: (Kg/m^3)

$$\rho_d = \frac{M_0}{V_t}$$

$$\rho_d = \frac{M_0}{M_s - M_h}$$

- Porosidad abierta: (%)

$$n_0 = \frac{V_v}{V_t} \times 100$$

$$n_0 = \frac{M_s - M_0}{M_s - M_h} \times 100$$

- Contenido en agua en saturación: (%)

$$n_0 = w_s \cdot \rho_d \quad \leftarrow$$

$$w_s = \frac{M_s - M_0}{M_0} \times 100$$

UNE-EN 1936.

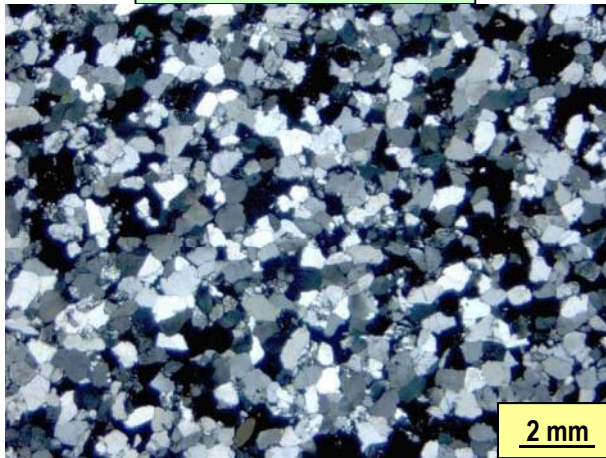
Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.



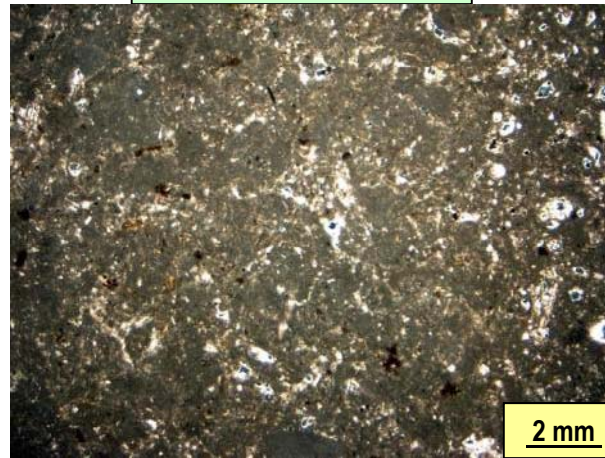
DENSIDAD - POROSIDAD: Ejemplos

Observación de poros: Microscopía óptica de polarización

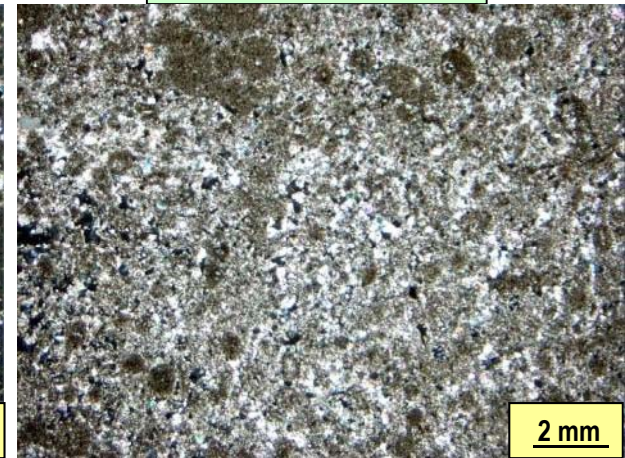
Arenisca de Villaviciosa



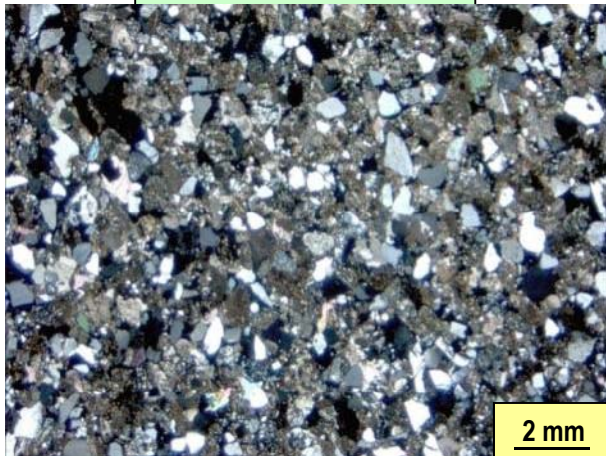
Caliza de Fraga



Dolomía de Boñar



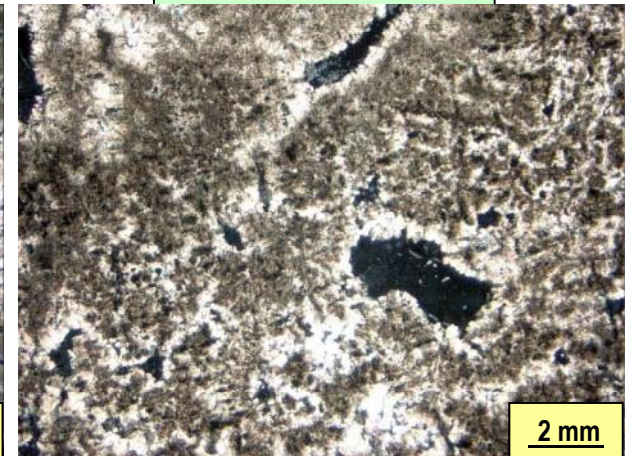
Arenisca de Uncastillo



Caliza de Santa Pudia



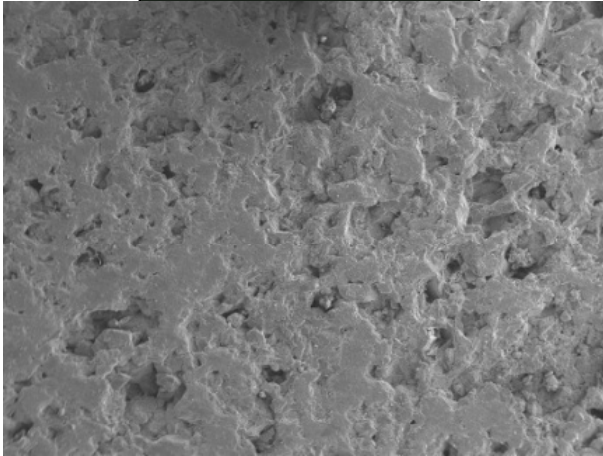
Travertino de Albox



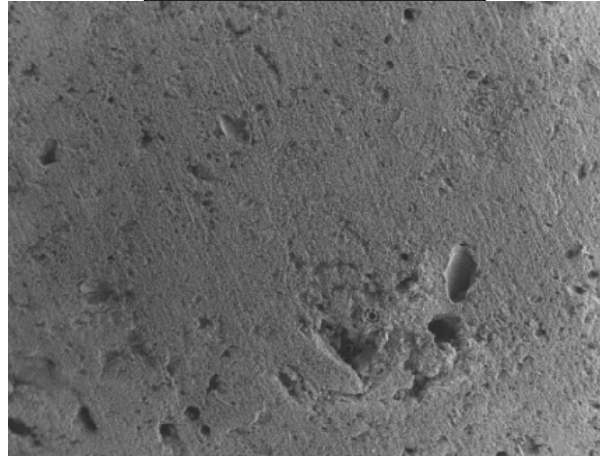
DENSIDAD - POROSIDAD: Ejemplos

Observación de poros: Microscopía electrónica de barrido

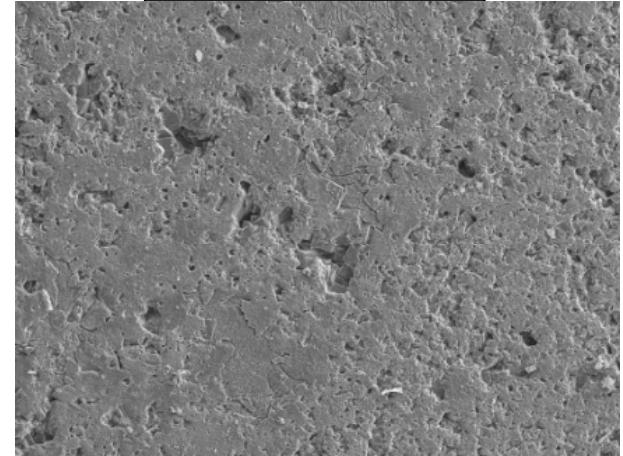
Arenisca de Villaviciosa



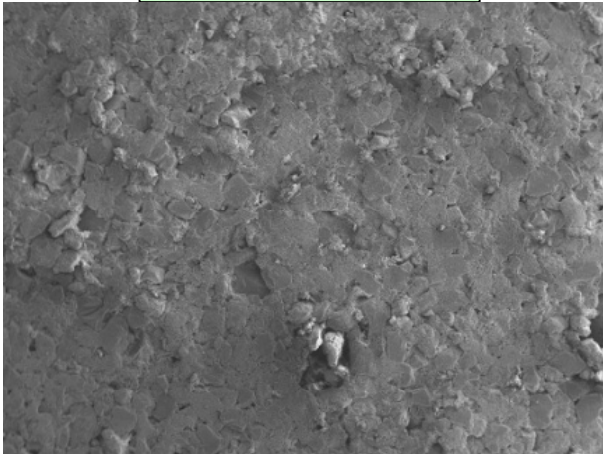
Caliza de Fraga



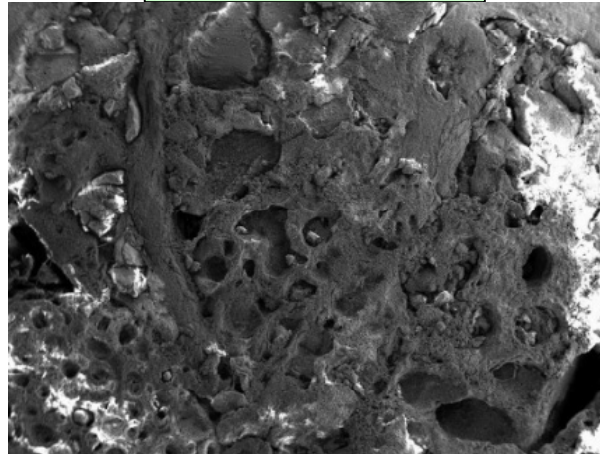
Dolomía de Boñar



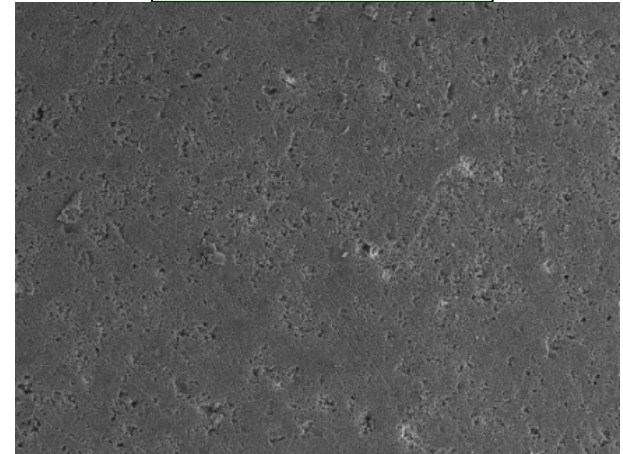
Arenisca de Uncastillo



Caliza de Santa Pudía



Travertino de Albox



DENSIDAD - POROSIDAD: Ejemplos

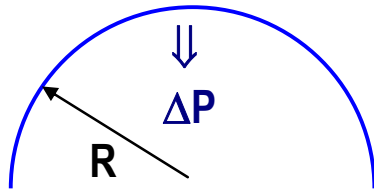
Resultados

TIPO DE ROCA		DENSIDAD			POROSIDAD		
		Densidad de los granos minerales	Densidad de la roca seca	Densidad de la roca seca	Porosidad total	Porosidad abierta	Porosidad cerrada
		ρ_s (kg / m ³)	ρ_d (kg / m ³)	ρ_d (kg / m ³)	n (%)	n _o (%)	n _c (%)
		Valor teórico	Método geométrico	Método hidrostático	Valor teórico	Método hidrostático	Valor teórico
Arenisca de Villaviciosa	x	2651	2104	2127	19,7	19,7	0,03
	σ	-	17	17	-	0,2	-
Arenisca de Uncastillo	x	2729	2044	2097	23,1	22,3	0,9
	σ	-	28	4	-	0,2	-
Caliza de Fraga	x	2694	1911	1890	29,8	29,8	0,05
	σ	-	38	24	-	0,8	-
Caliza de Santa Pudia	x	2712	1694	1737	36,0	35,9	0,1
	σ	-	16	8	-	0,2	-
Dolomía de Boñar	x	2822	2427	2505	11,2	11,2	0,1
	σ	-	49	29	-	1,0	-
Travertino de Albox	x	2710	2331	2338	13,7	11,3	2,4
	σ	-	19	13	-	0,3	-

POROSIMETRÍA POR INYECCIÓN DE MERCURIO

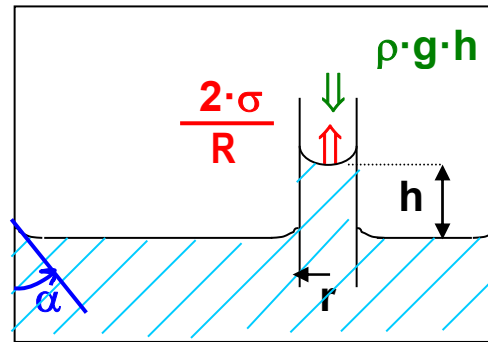
Fundamento

Ley de Laplace:



$$\Delta P = \frac{2 \cdot \sigma}{R}$$

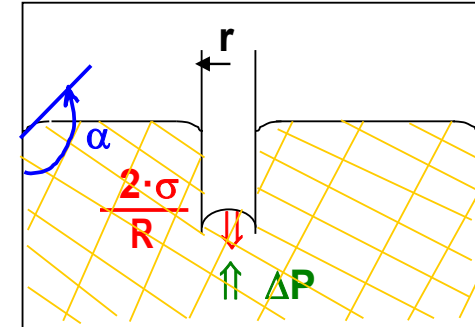
σ : tensión superficial
 ΔP : incremento de presión
 R : radio de curvatura



Agua → moja : $\alpha < 90^\circ$

CAPILARIDAD

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{\rho \cdot g \cdot r}$$



Hg → no moja: $\alpha > 90^\circ$

POROSIMETRÍA DE Hg

$$r = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \alpha}{\Delta P}$$

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/default.htm>

► Alonso F.J. (2006). *Porosimetría por inyección de mercurio*. Documento interno, Dpto. Geología. Univ. Oviedo, 6 p.

$$\alpha, \sigma = \text{cte} \longrightarrow r (\mu\text{m}) = \frac{7,5}{P (\text{Kg} / \text{cm}^2)}$$



POROSIMETRÍA POR INYECCIÓN DE MERCURIO

Observaciones

- Poros abiertos: accesibles al mercurio.
- Tamaño aparente: modelo de poro cilíndrico ideal.
- Tamaño de acceso los poros: conductos, cuellos.

Inconvenientes:

- Presiones elevadas: no afecta a las muestras
- Usa mercurio: protocolos de seguridad
- Ensayo irreversible: mercurio atrapado.

Ventajas:

- Rapidez del ensayo.
- Simplicidad de análisis.
- Amplio rango de tamaños (4 órdenes de magnitud).
 - La mayor significación en términos relativos



Carlo Erba



Micromeritics

POROSIMETRÍA POR INYECCIÓN DE MERCURIO

Resultados obtenidos

PARÁMETROS DEL SISTEMA POROSO:

- Densidad de la roca seca
- Densidad corregida (volumen: sólido + de poros cerrados)
- Porosidad abierta (accesible al mercurio)
- Porosidad atrapada
- Superficie específica
- Radio de acceso de poro (media, moda, mediana)

CURVAS DE DISTRIBUCIÓN + HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA

- Volumen de poros en función del tamaño de acceso
- Superficie específica en función del tamaño...
 - Porcentaje de poros: mayores de 10 micras
 - Porcentaje de poros: entre 10 y 0,1 micras
 - Porcentaje de poros: menores de 0,1 micras

Práctica 6. Obtención de parámetros del sistema poroso mediante porosimetría por inyección de mercurio

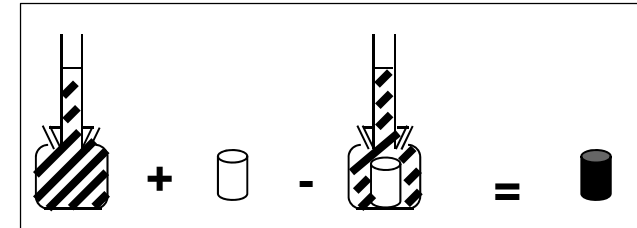


POROSIMETRÍA POR INYECCIÓN DE MERCURIO

DATOS:

P_1 (Muestra)	[g]
P_2 (Dilatómetro + Hg)	[g]
P_3 (Dilatómetro + Muestra + Hg)	[g]
P_4 (Muestra + Hg)	[g]
T.C.V. (Volumen de poros)	[mm ³ /g]
Densidad Hg = 13,6	[g/cm ³]

Resultados: Parámetros



- VOLUMEN DE LA MUESTRA :**

$$V_t = (P_1 + P_2 - P_3) / 13,6 \quad [\text{cm}^3]$$

- DENSIDAD DE LA ROCA SECA :**

$$\rho_d = P_1 / V_t \quad [\text{g/cm}^3]$$

- POROSIDAD ABIERTA (ACCESIBLE AL Hg) :**

$$V_p = \text{T.C.V.} \times P_1 \quad [\text{mm}^3]$$

$$n_o = (V_p / V_t \times 1000) \times 100 \quad [\%]$$

- POROSIDAD ATRAPADA :**

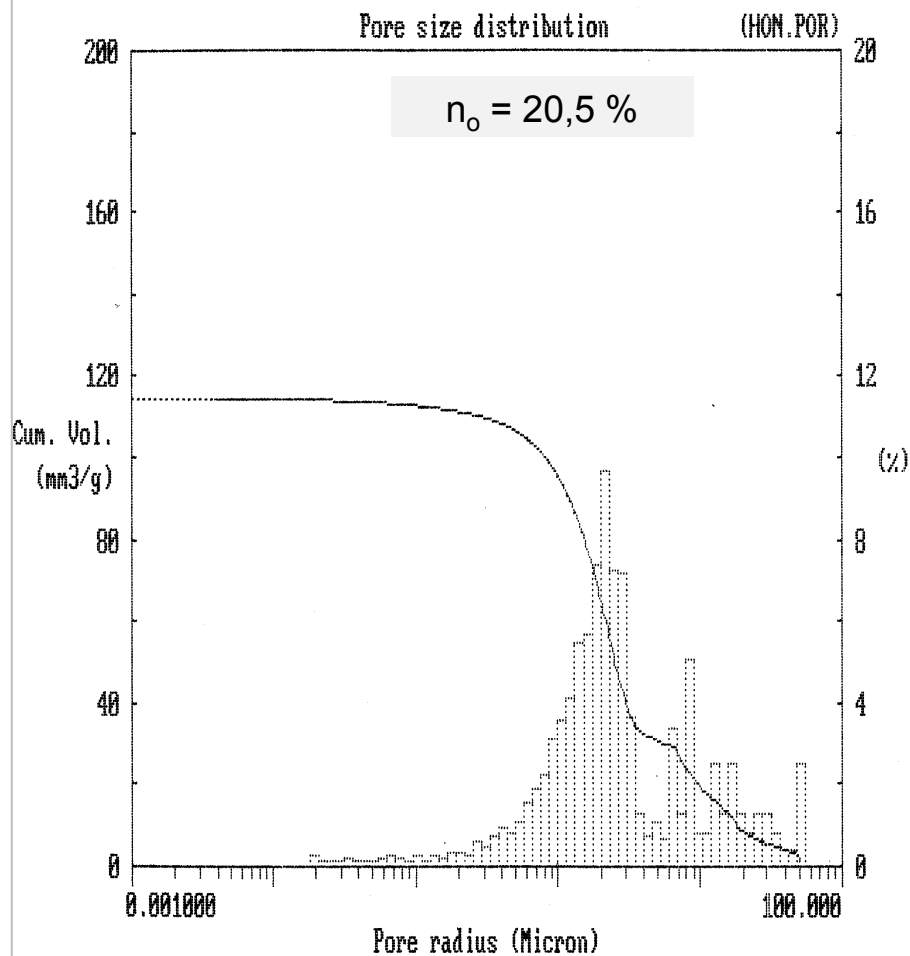
$$V_{Hg} = (P_4 - P_1) / 13,6 \quad [\text{cm}^3]$$

$$n_{atp} = (V_{Hg} / V_t) \times 100 \quad [\%]$$

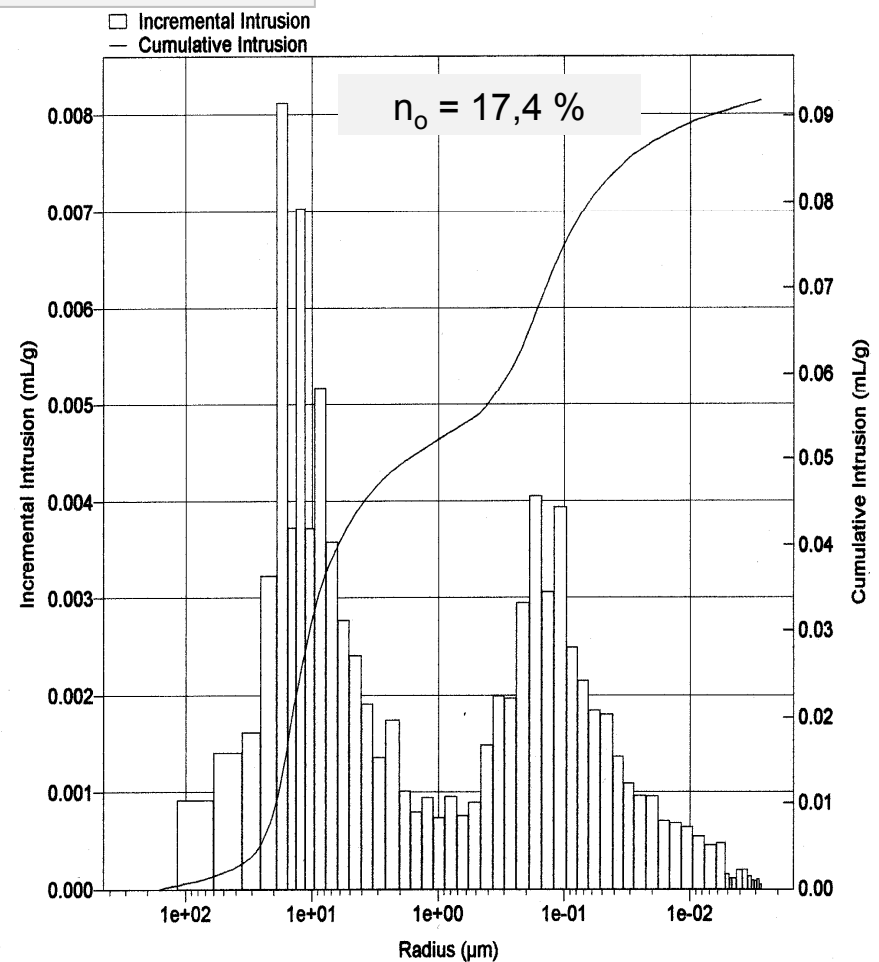
POROSIMETRÍA POR INYECCIÓN DE MERCURIO

Resultados: Curvas de distribución

Carlo Erba

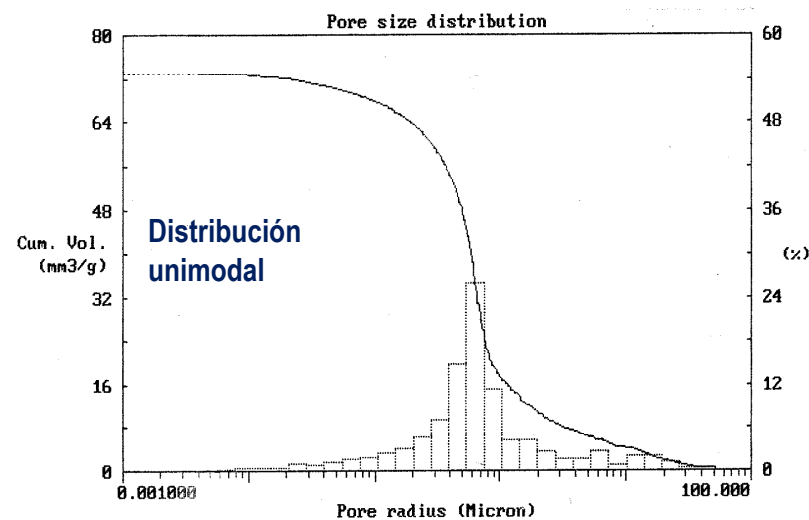
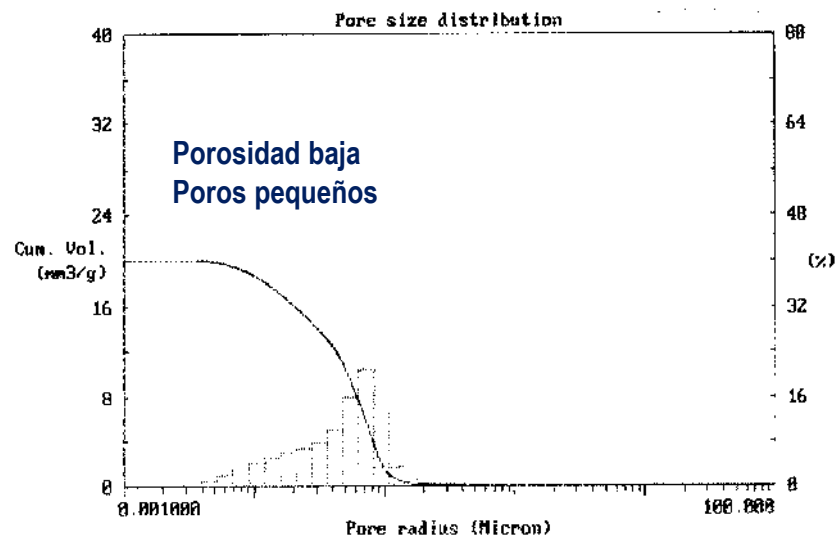
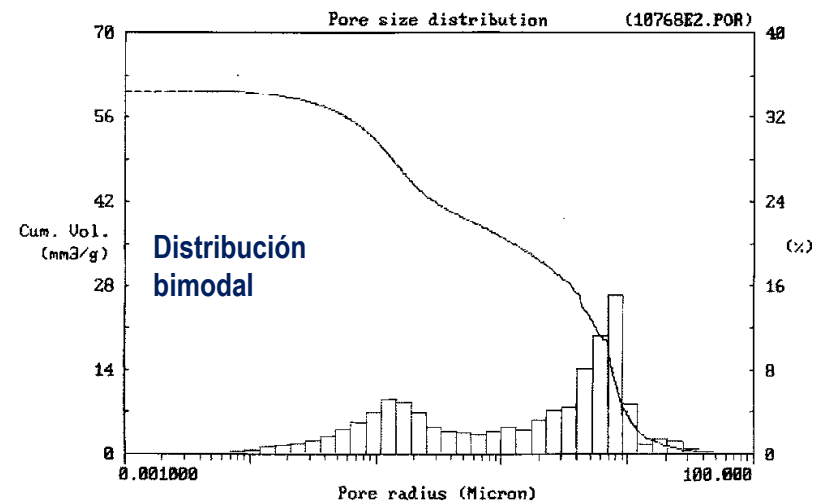
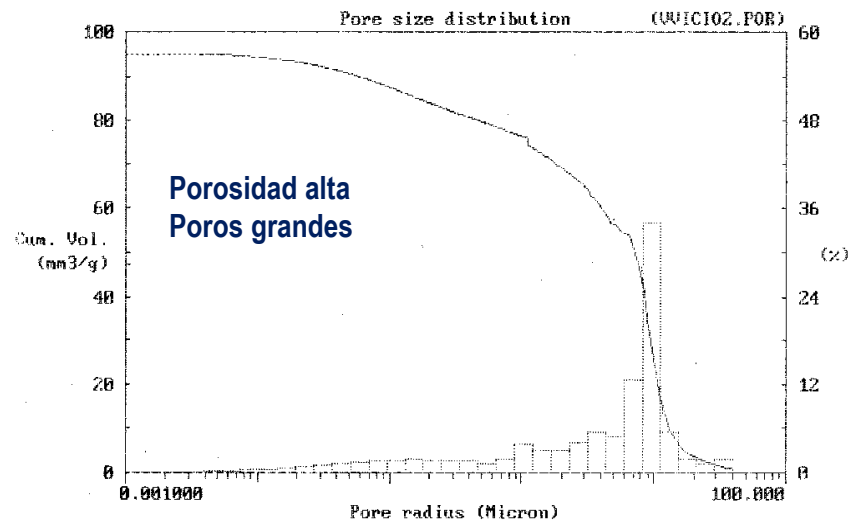


Micromeritis



POROSIMETRÍA POR INYECCIÓN DE MERCURIO

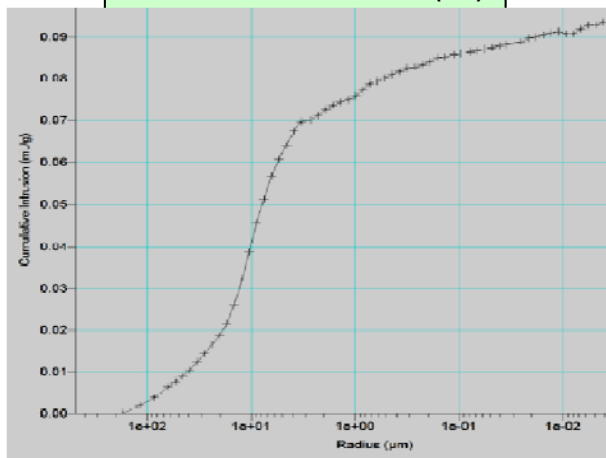
Resultados: curvas de distribución



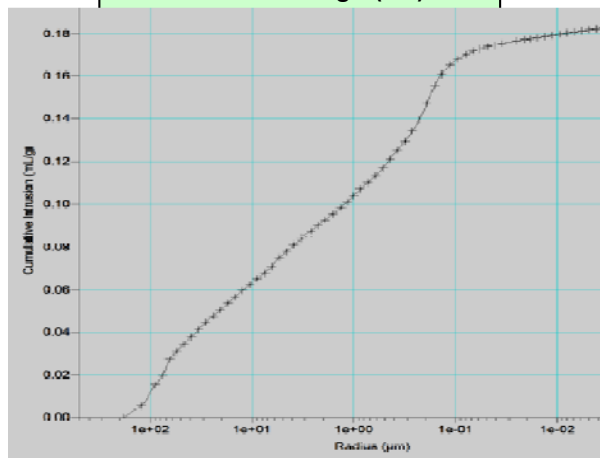
POROSIMETRÍA POR INYECCIÓN DE MERCURIO: Ejemplos

Curvas de distribución

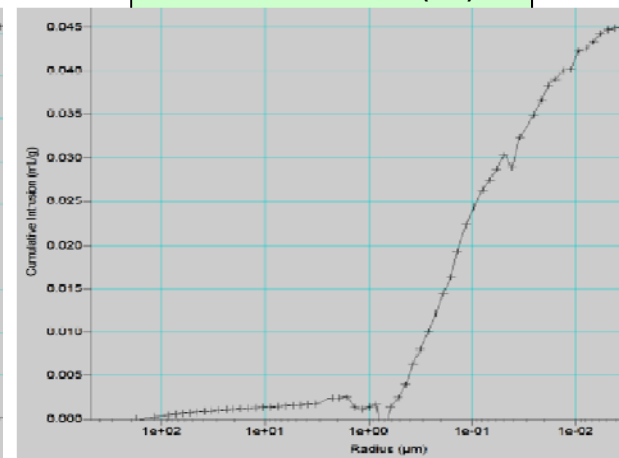
Arenisca de Villaviciosa (AV)



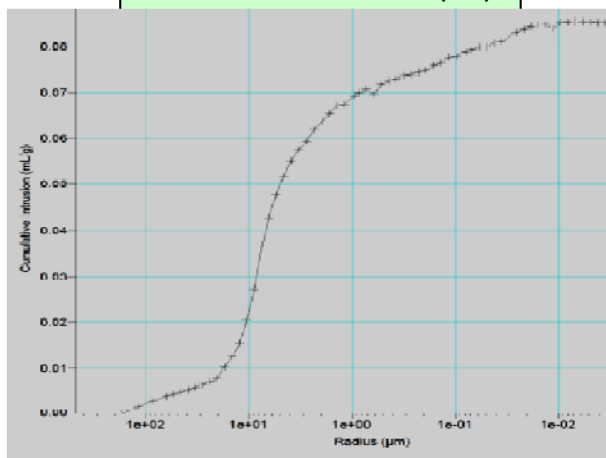
Caliza de Fraga (CF)



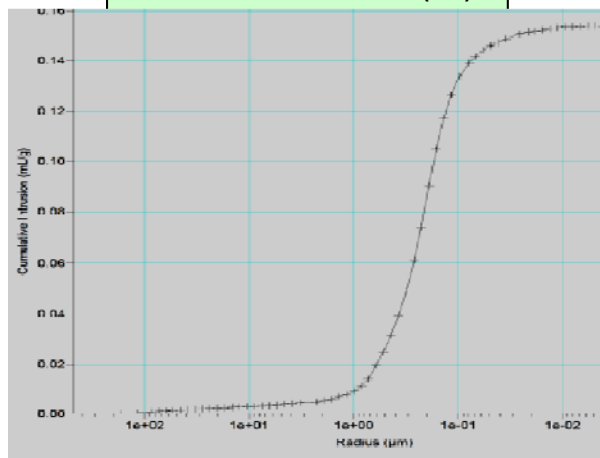
Dolomía de Boñar (DB)



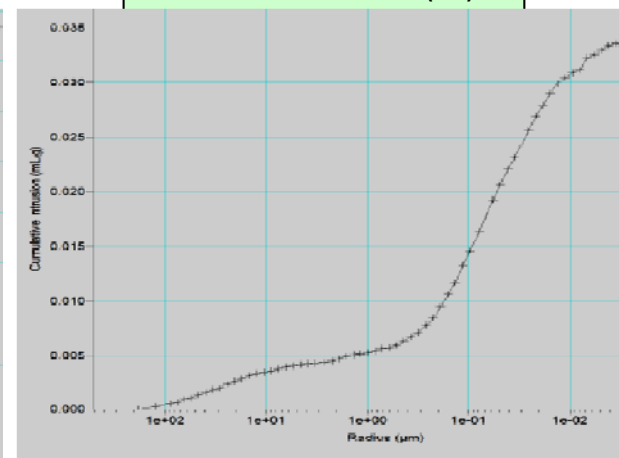
Arenisca de Uncastillo (AU)



Caliza de Santa Pudia (SP)



Travertino de Albox (TA)



POROSIMETRÍA POR INYECCIÓN DE MERCURIO: Ejemplos

Resultados

Parámetros del sistema poroso

Roca	Diámetro de poro (mm)		Porosimetría de mercurio				
			Radio de acceso (μm)	Coeficiente de dispersión	Distribución de tamaños Porosidad absoluta (relativa)		
	D_M	D_m	R_m	C_d	> 10	10 - 0,1	< 0,1
AV	0,5	0,2	8	0,94	8,0 (41%)	9,4 (48%)	2,1 (11%)
AU	0,2	0,1	6	0,73	6,1 (27%)	14,5 (64%)	2,0 (9%)
CF	1	0,5	0,2	0,41	0,7 (2,5%)	24,6 (84%)	4,0 (13,5%)
SP	4	1	1	1,85	11,1 (31%)*	21,1 (59%)	3,6 (10%)
DB	0,1	0,05	0,09	0,72	0,3 (3%)	5,7 (52%)	5,0 (45%)
TA	5	2	0,07	0,91	1,1 (10%)*	3,5 (31,5%)	6,6 (58,5%)

Diámetro de poro por observación directa: centil (D_M), moda (D_m).

Radio de acceso de poro obtenido por MIP: mediana (R_m), coeficiente de variación (C_d).

*Presencia de poros mayores al rango analizado por porosimetría.

PROPIEDADES HÍDRICAS

❖ Absorción de agua a presión atmosférica / por inmersión total (IMBIBICIÓN)

- Inmersión total en agua (**UNE-EN 13755: 2008; NORMAL 7/81; CEN/TC 346 WG 3**)
 - Contenido en agua (absorción de agua)
 - Grado de saturación

❖ Absorción de vapor de agua (HIGROSCOPÍA)

- Exposición en ambiente con T y Hr constantes
 - Contenido en agua
 - Grado de saturación

❖ Desorción de agua (EVAPORACIÓN)

- Exposición en ambiente con T y Hr constantes (**NORMAL 29/88; CEN/TC 346 WG 3**)
 - Contenido en agua
 - Grado de saturación

❖ Absorción de agua por capilaridad (SUCCIÓN CAPILAR)

- Superficie horizontal en contacto con agua (**UNE-EN 1925:1999; NORMAL 11/85; UNE-EN 15801**)
 - Coeficiente de absorción capilar
 - Coeficiente de penetración capilar

❖ Permeabilidad al vapor de agua (DIFUSIVIDAD)

- Circulación de humedad en permeámetro (**NORMAL 21/85; UNE-EN 15803**)
 - Coeficiente de permeabilidad

❖ Expansión hídrica (HINCHAMIENTO)

- Inmersión en agua en cubeta con comparadores (**RILEM 1980**)
 - Coeficiente de dilatación lineal o hinchamiento

► Alonso F.J. (2014). *Fichas: Propiedades físicas de rocas (hojas para toma de datos y hoja de cálculo)*. Documento interno, Dpto. Geología. Univ. Oviedo, 14 p.

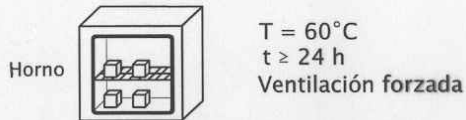


PROPIEDADES HÍDRICAS: SATURACIÓN = absorción de agua forzada (al vacío)

➤ Método de la pesada hidrostática (UNE-EN 1936:2007; RILEM 1980)

--- Densidad de la roca seca // --- Porosidad abierta // --- Contenido en agua en saturación

• Secado:



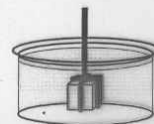
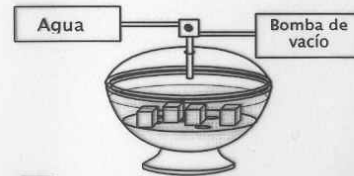
→ Determinar peso seco: M_0

• Saturación al vacío

- 24 h vacío seco
- 24 horas vacío en agua
- 24 horas sin vacío en agua

→ Determinar peso saturado: M_s

→ Determinar peso sumergida en agua (peso hidrostático): M_h



Parámetros:

- Densidad de la roca seca: (Kg/m³)

$$\rho_d = \frac{M_0}{V_t}$$

$$\rho_d = \frac{M_0}{M_s - M_h}$$

- Porosidad abierta: (%)

$$n_0 = \frac{V_v}{V_t} \times 100$$

$$n_0 = \frac{M_s - M_0}{M_s - M_h} \times 100$$

- Contenido en agua en saturación: (%)

$$n_0 = w_s \times \rho_d$$



$$w_s = \frac{M_s - M_0}{M_0} \times 100$$

UNE-EN 1936.

Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.



PROPIEDADES HÍDRICAS: IMBIBICIÓN = absorción de agua a presión atmosférica

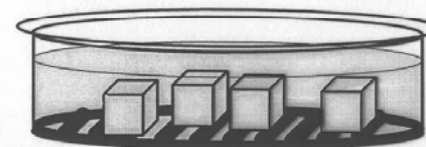
➤ Inmersión total en agua (UNE-EN 13755: 2008; NORMAL 7/81)

--- Contenido en agua (absorción de agua)

--- Grado de saturación

Ensayo:

- Determinar el peso seco: M_0
 - Inmersión total en agua destilada
- Determinar peso: $M(t)$
 - Duración: 2, 8, 30 días, $M(t) = \text{cte}$



→ *Determinar:*

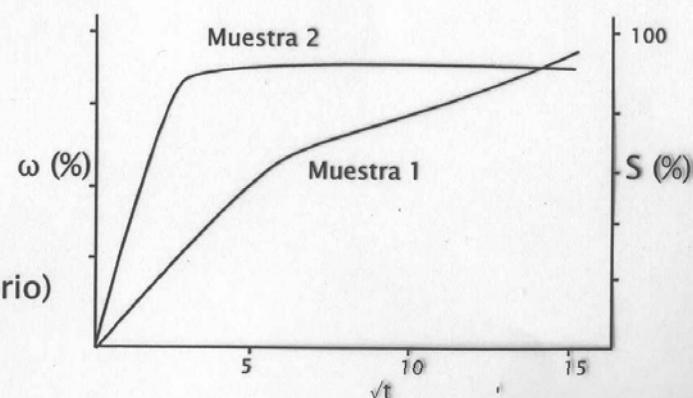
$$\omega(t) = \frac{M(t) - M_0}{M_0} \times 100$$

$$S(t) = \frac{\omega(t)}{\omega_s} \times 100$$

→ *Obtener:*

- Curvas de absorción libre de agua
- Parámetros

- | | |
|-----------------------|--------------------------|
| • Contenido en agua | Para 2 días |
| • Grado de saturación | Al final (en equilibrio) |



UNE-EN 13755.

Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica.

PROPIEDADES HÍDRICAS: SECADO = desorción de agua = evaporación

➤ Exposición en ambiente con T y Hr constantes (NORMAL 29/88; UNE-EN 16322)

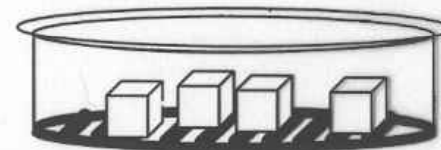
--- Contenido en agua

--- Grado de saturación

Ensayo:

- Determinar el peso saturado: M_s
 - Introducir en ambiente con T y Hr = cte
- Determinar peso: $M(t)$
 - Duración: 2, 8 días, $M(t) = \text{cte}$

T = 21 °C Hr = 75%



→ *Determinar:*

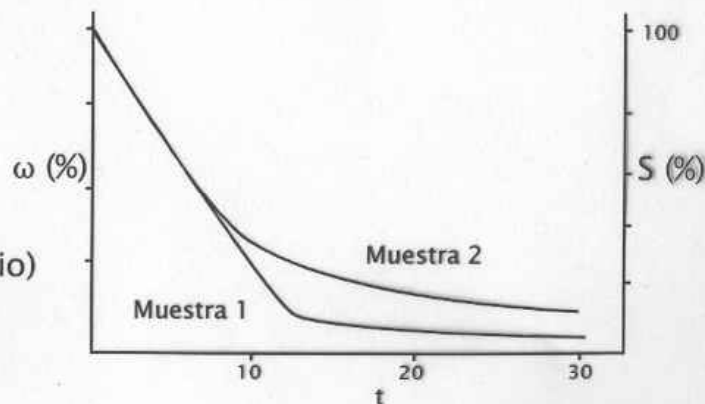
$$\omega(t) = \frac{M(t) - M_0}{M_0} \times 100$$

$$S(t) = \frac{\omega(t)}{\omega_s} \times 100$$

→ *Obtener:*

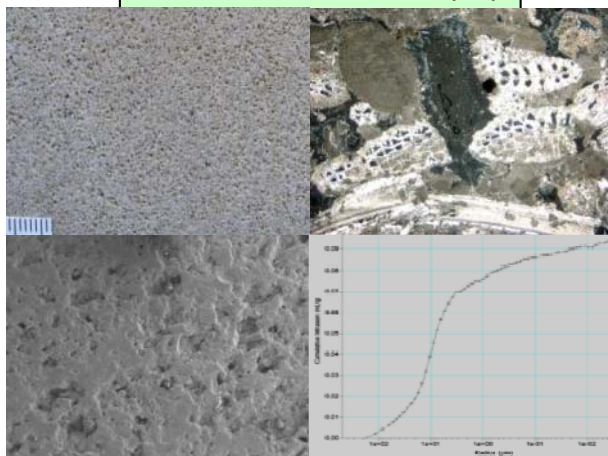
- Curvas de secado
- Parámetros
 - Contenido en agua
 - Grado de saturación

Final (en equilibrio)

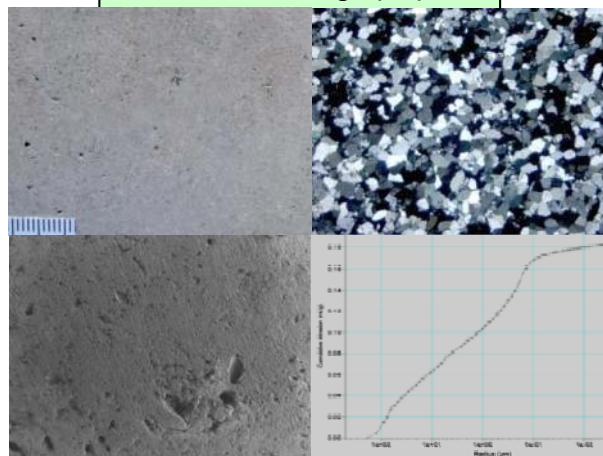


PROPIEDADES HÍDRICAS: Ejemplos

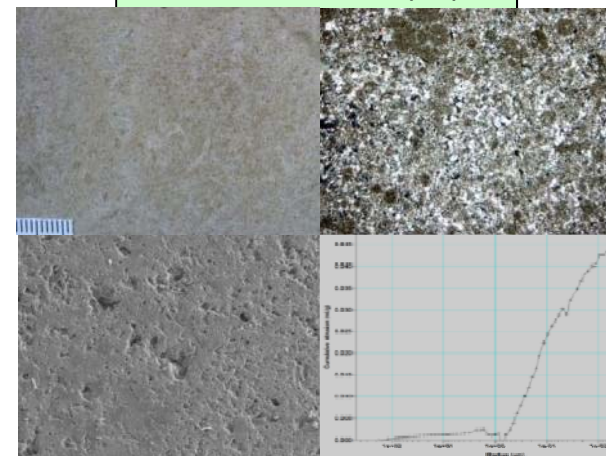
Arenisca de Villaviciosa (AV)



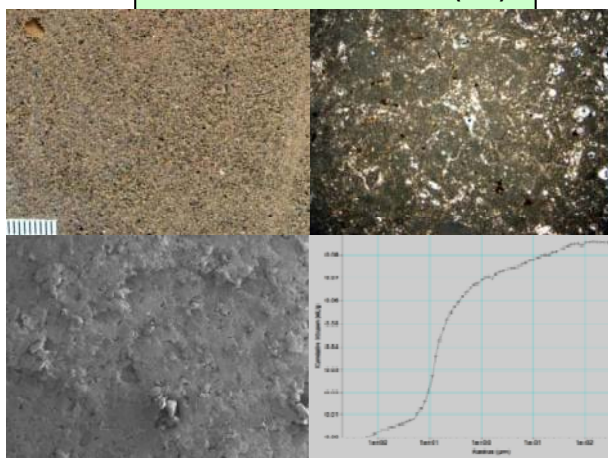
Caliza de Fraga (CF)



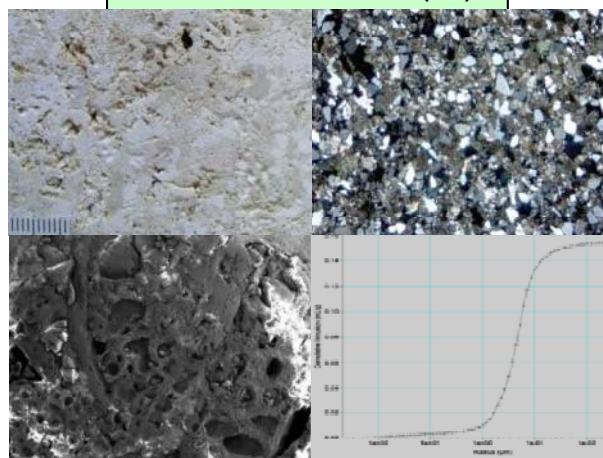
Dolomía de Boñar (DB)



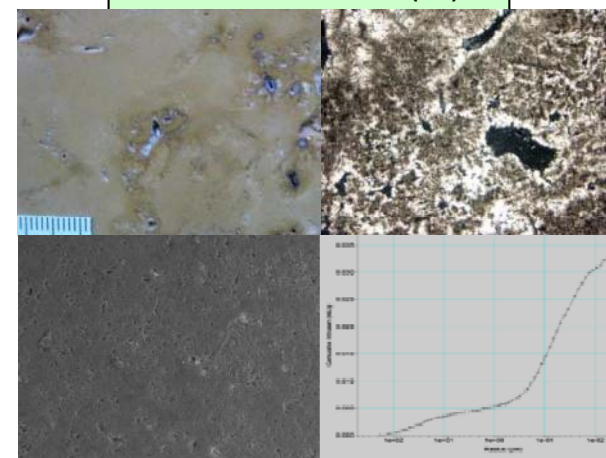
Arenisca de Uncastillo (AU)



Caliza de Santa Pudia (SP)

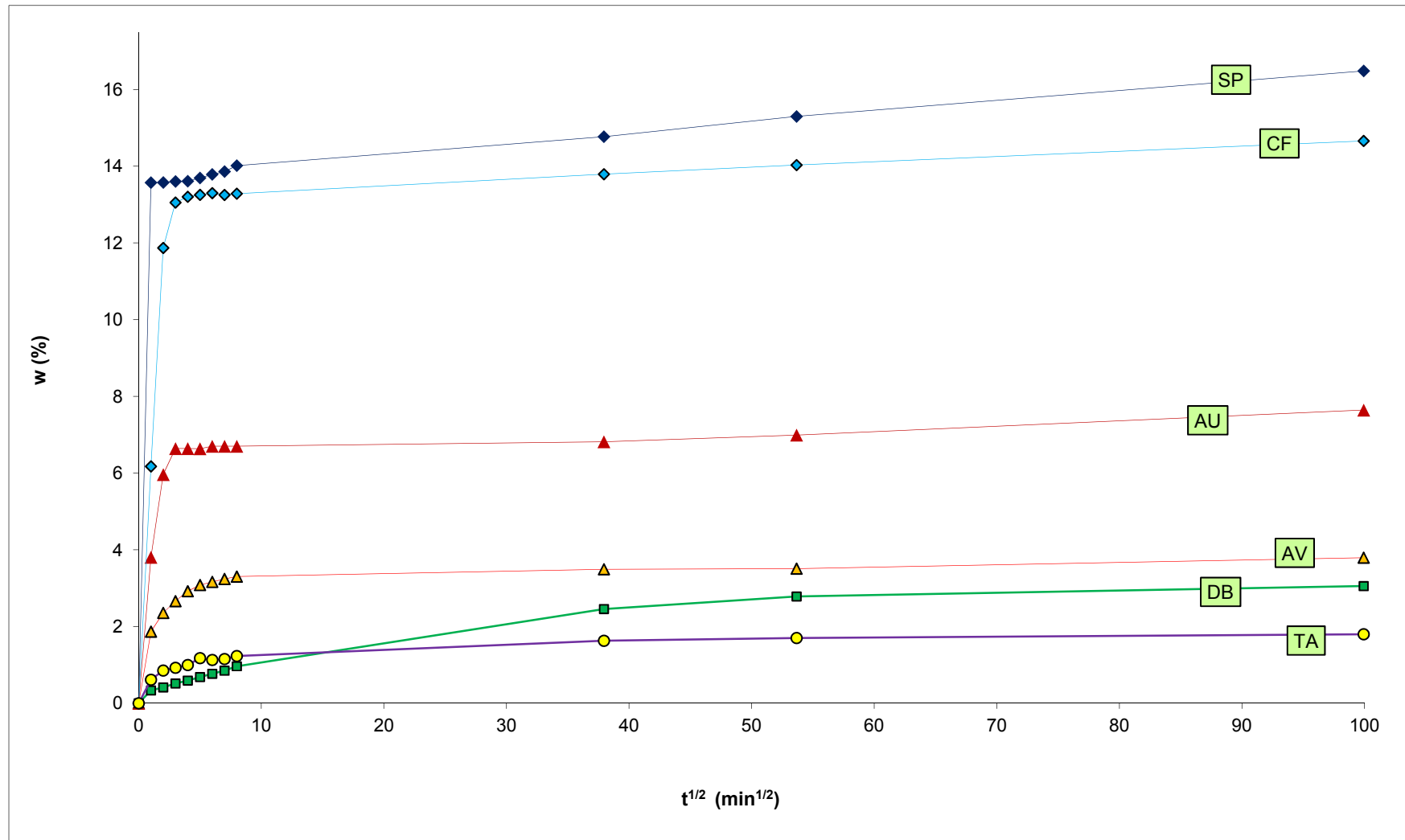


Travertino de Albox (TA)



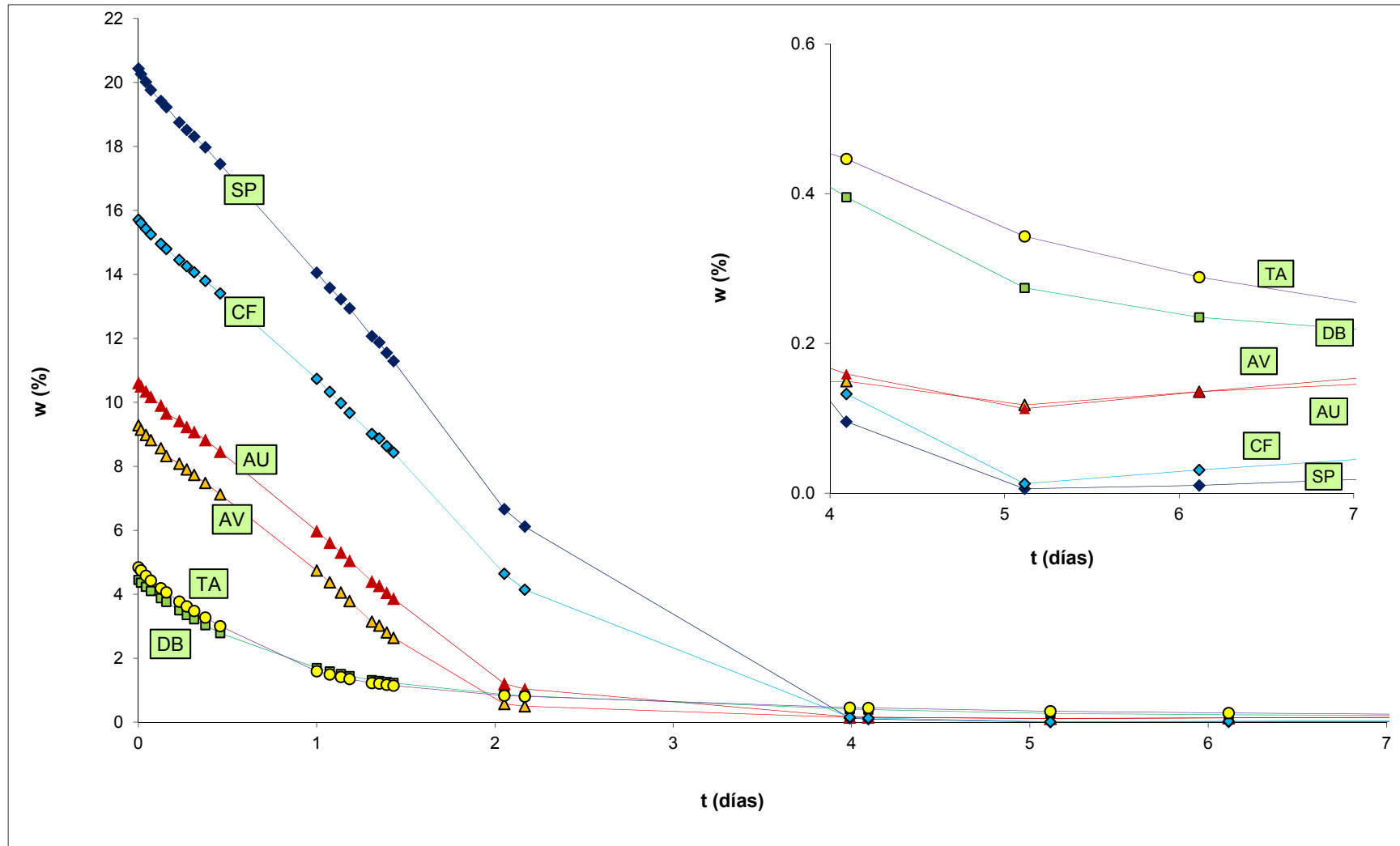
PROPIEDADES HÍDRICAS: Ejemplos

Absorción de agua



PROPIEDADES HÍDRICAS: Ejemplos

Evaporación



PROPIEDADES HÍDRICAS: Ejemplos

Absorción de agua y evaporación

Roca	Saturación	Absorción de agua				Evaporación			
	w_s (%)	w_t (%)		S_t (%)		w_t (%)		S_t (%)	
		1 hora	7 días	1 hora	7 días	1 hora	7 días	1 hora	7 días
AV	9,3 ± 0,2	3,3	3,8	36	41	8,9	0,15	97	1,6
AU	10,8 ± 0,2	6,7	7,6	63	72	10,3	0,16	97	1,5
CF	15,4 ± 0,5	13,3	14,7	84	93	15,4	0,05	98	0,3
SP	20,4 ± 0,3	14,0	16,5	68	80	20,0	0,02	97	0,1
DB	4,3 ± 0,2	0,96	3,0	22	68	4,2	0,22	95	5
TA	4,8 ± 0,1	1,2	1,8	28	41	4,6	0,25	95	5

w_s = contenido en agua en saturación;

w_t = contenido en agua en t;

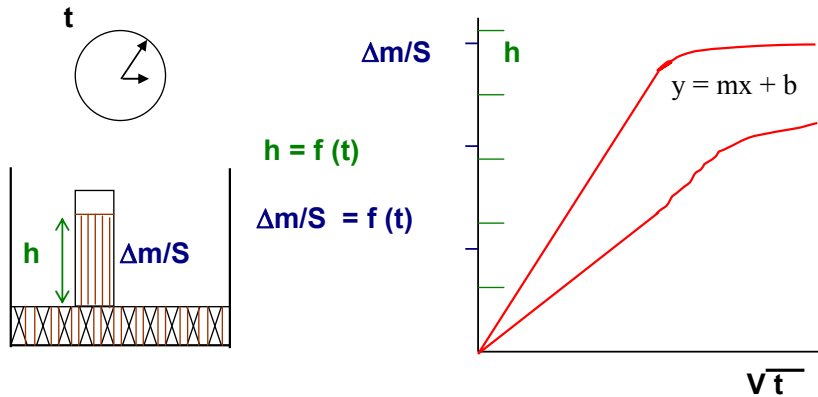
S_t = grado de saturación en t.

► Vázquez P. et al. (2013). *Evaluation of the petrophysical properties of sedimentary building stones in order to establish quality criteria*. Construction and Building Materials 41, 868-878.



PROPIEDADES HÍDRICAS: Ejemplos

COEFICIENTES DE CAPILARIDAD



$$h = A \cdot \sqrt{t}$$

$$\Delta m/S = C \cdot \sqrt{t}$$

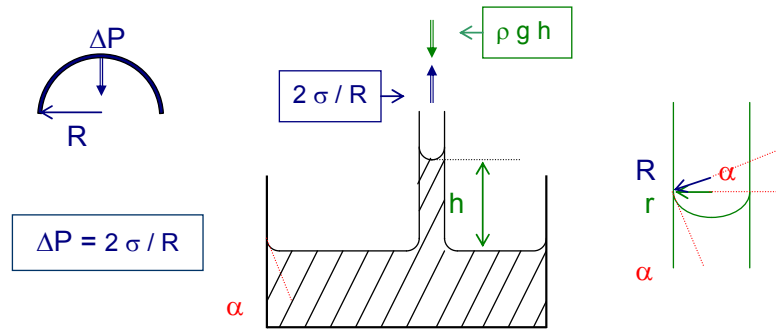
$$A = \frac{\sqrt{\sigma \cos \alpha r}}{2 \eta}$$

$$C = 10 \cdot n_0 \cdot A$$

En la etapa inicial (a partir de la roca seca):

- en los poros grandes → el agua sube rápidamente
- en los poros pequeños → el agua sube lentamente

ALTURA ASCENDIDA



$$h = \frac{2\sigma \cos \alpha}{\rho g r}$$

$$h \text{ (cm)} = \frac{0,15}{r \text{ (}\mu\text{m)}}$$

En la etapa final (en condiciones de equilibrio):

- en poros grandes → el agua alcanza poca altura
- en poros pequeños → el agua sube más alto

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/default.htm>

Práctica 7. Determinación de propiedades físicas: Capilaridad



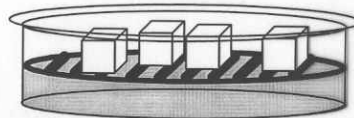
PROPIEDADES HÍDRICAS: SUCCIÓN CAPILAR = absorción de agua por capilaridad

- Superficie horizontal en contacto con agua (UNE-EN 1925; NORMAL 11/85; UNE-EN 15801)

Ensayo:

- Determinar peso seco: M_0
 - Colocar sobre agua destilada
- Determinar peso: $M(t)$
- Determinar altura: H
 - Duración: 1, 4 horas

$T = 21^\circ\text{C}$ $H_r = 75\%$



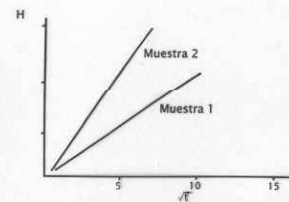
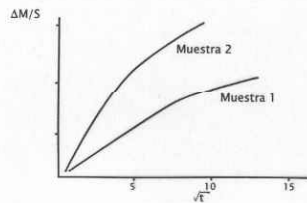
→ Determinar:

$$\frac{\Delta M(t)}{S}$$

H

→ Obtener:

- Curvas de capilaridad



- Coeficiente de absorción capilar: C

$$C = \frac{\Delta M/S}{\sqrt{t}}$$

$$\frac{\text{kg/m}^2}{\text{h}^{1/2}}$$

- Coeficiente de penetración capilar: A

$$A = \frac{H}{\sqrt{t}}$$

$$\frac{\text{m}}{\text{h}^{1/2}}$$

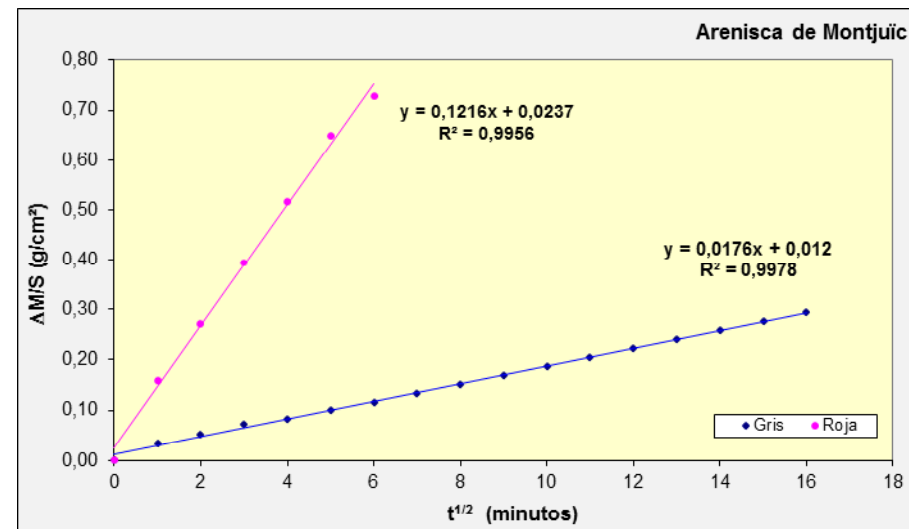
Relación teórica: $C = 10 n_0 A$

--- Coeficiente de absorción capilar

--- Coeficiente de penetración capilar



UNE-EN 1925.
Determinación
del coeficiente de
absorción de agua
por capilaridad



PROPIEDADES HÍDRICAS: DIFUSIVIDAD = permeabilidad al vapor de agua

➤ Circulación de humedad en permeámetro (NORMAL 21/85; UNE-EN 15803)

Ensayo: Muestra: lajas de 1 cm de espesor

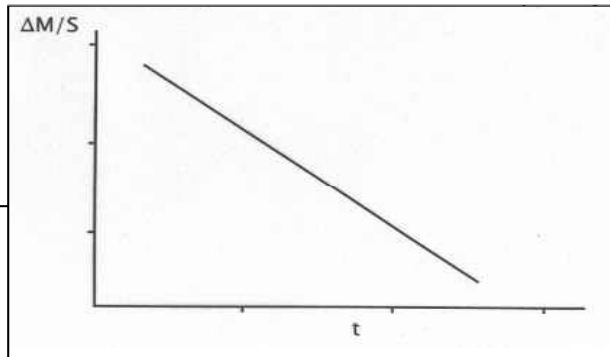
- Determinar espesor muestra seca (≈ 1 cm)
- Preparar célula de medida ($\phi = 3.5$ cm)
 - Colocar la muestra, cerrar herméticamente
- Determinar peso total: M_0
 - Introducir en ambiente ($T, H_r = \text{cte}$)
 - Duración: 8 días, $\Delta M(t) = \text{cte}$

→ **Determinar:**

$$\frac{\Delta M(t)}{S} = \frac{M(t) - M_0}{S}$$

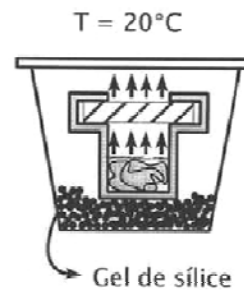
→ **Obtener:**

• $\Delta M/S = f(t)$

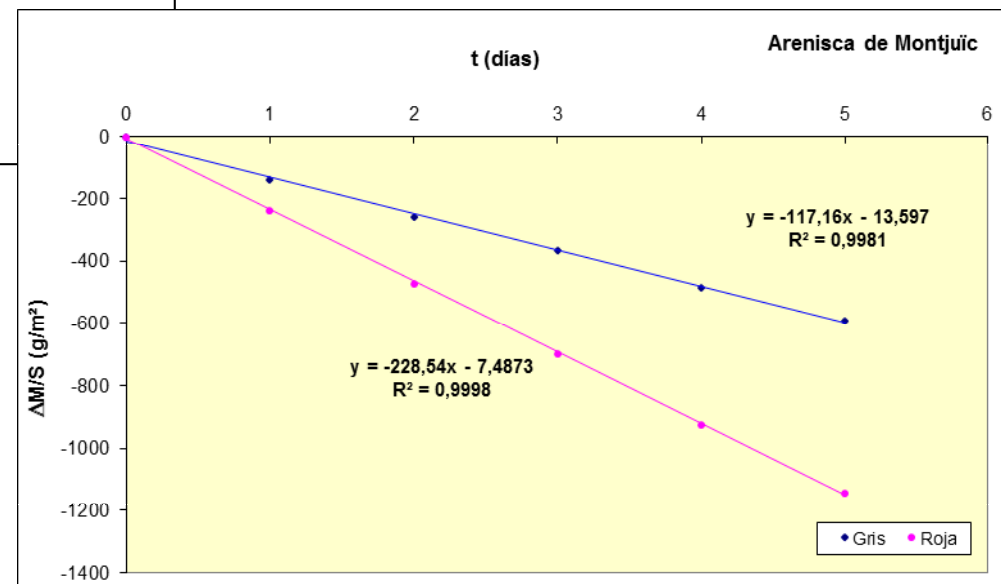


- Coeficiente de permeabilidad al vapor

$$K = \frac{\Delta M}{S \cdot t(d_{\text{vapor}})} \quad K = \frac{\Delta M/S \cdot e}{t \cdot \Delta P}$$



--- Coeficiente de permeabilidad



PROPIEDADES HÍDRICAS: Ejemplos

Capilaridad y permeabilidad al vapor

Roca	Absorción capilar	Penetración capilar	Permeabilidad al vapor
	C (g / m ² s ^{1/2})	B (mm / s ^{1/2})	Kv (g / m ² día)
AV	31 ± 3	0,46 ± 0,07	149 ± 13
AU	166 ± 5	1,18 ± 0,08	241 ± 6
CF	166 ± 6	0,67 ± 0,07	215 ± 12
SP	353 ± 5	1,9 ± 0,5	291 ± 15
DB	3,7 ± 0,2	0,05 ± 0,02	88 ± 8
TA	4,4 ± 0,4	0,20 ± 0,01	53 ± 15

C = coeficiente de absorción capilar

B = coeficiente de penetración capilar

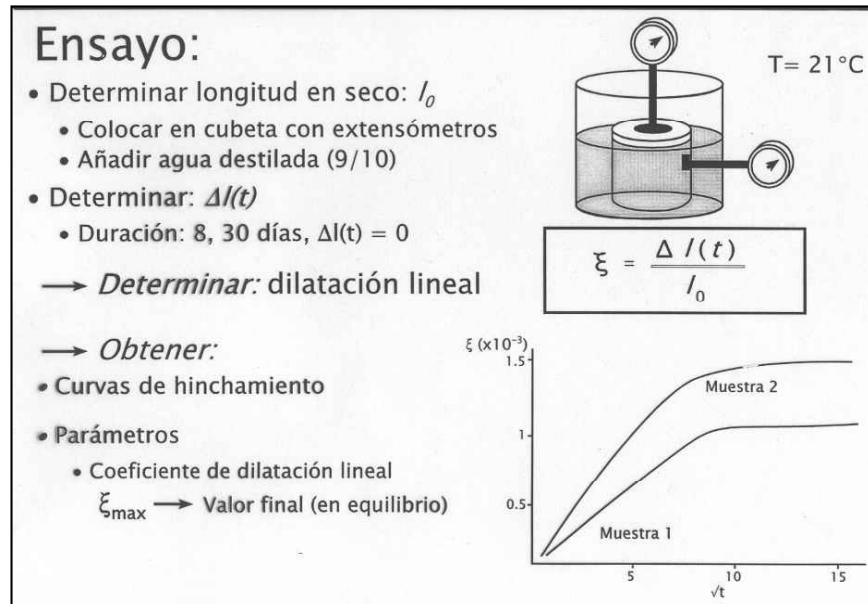
Kv = coeficiente de permeabilidad al vapor de agua

► Alonso F.J. et al. (2012). *Propiedades hídricas y anisotropía en rocas sedimentarias porosas*. Geotemas (SGE) 13, 249. VIII Congreso Geológico de España, Oviedo, 4 p.

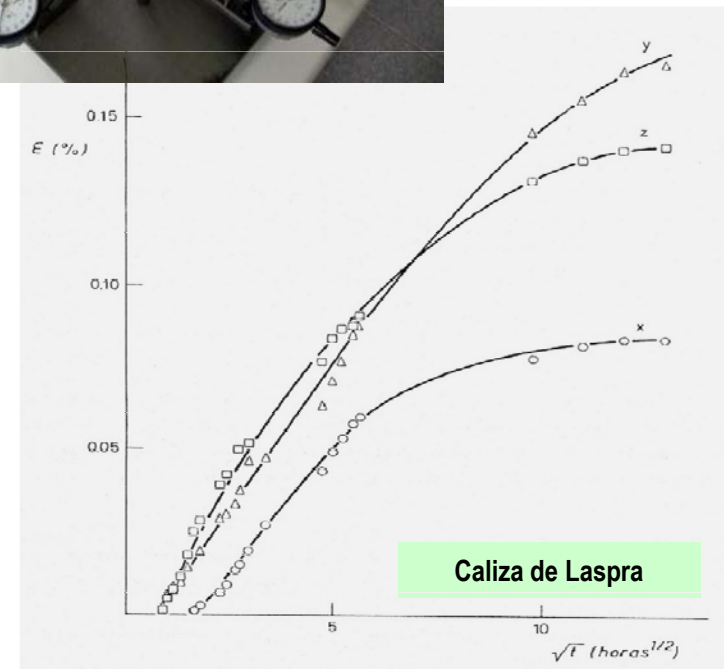
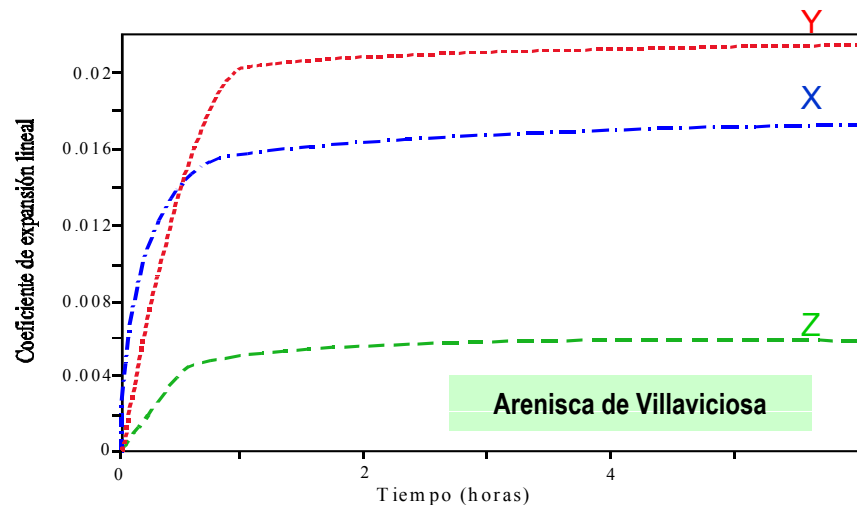


PROPIEDADES HÍDRICAS: HINCHAMIENTO = expansión hídrica

➤ Inmersión en agua en cubeta con comparadores (RILEM 1980)



--- Coeficiente de dilatación lineal o hinchamiento



PROPIEDADES MECÁNICAS, DINÁMICAS Y TÉRMICAS

❖ Propiedades mecánicas de volumen

- Resistencia a la compresión uniaxial (UNE-EN 1926:2007)
- Módulo de elasticidad estático (UNE-EN 14580:2006)
- Resistencia a la tracción /Ensayo brasileño (UNE 22950-2:1990)
- Resistencia al flexión (UNE-EN 12372:2007; UNE-EN 13161:2008)
- Resistencia a la carga de rotura a los anclajes (UNE-EN 13364:2002)
- Resistencia al rebote/Dureza escleroscópica /Martillo Schmidt (UNE-EN 12504-2:2002)
- Resistencia al choque/Dureza al impacto/Energía de rotura (UNE-EN 14158:2004)

❖ Propiedades mecánicas de superficie

- Dureza a la penetración / Dureza Knoop (UNE-EN 14205:2004)
- Dureza/Resistencia a la abrasión (UNE-EN 14157:2005)
- Resistencia al deslizamiento (UNE-EN 14231:2004)

❖ Propiedades dinámicas

- Velocidad de propagación de ondas (UNE-EN 14579:2005)
- Módulo de elasticidad dinámico (UNE-EN 14146:204)

❖ Propiedades térmicas

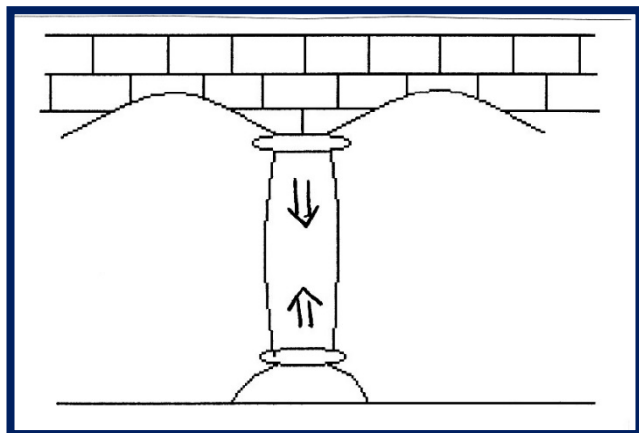
- Coeficiente de dilatación térmica (UNE-EN 14581:2006)
- Conductividad térmica, calor específico

► Suárez del Río L.M. et al. (2002). *Características tecnológicas de las rocas ornamentales de Asturias*. Trabajos de Geología 23, 73-84.

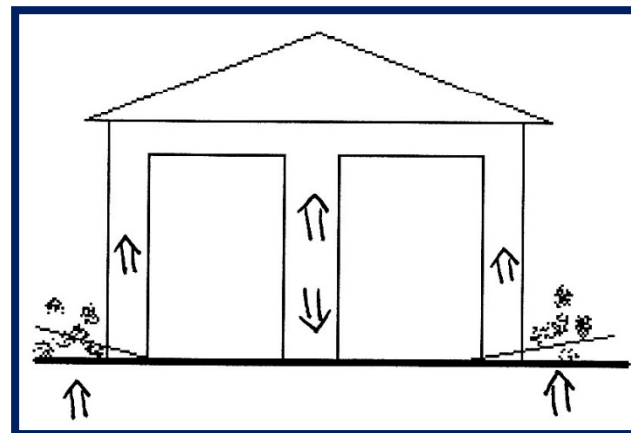


PROPIEDADES MECÁNICAS DE VOLUMEN

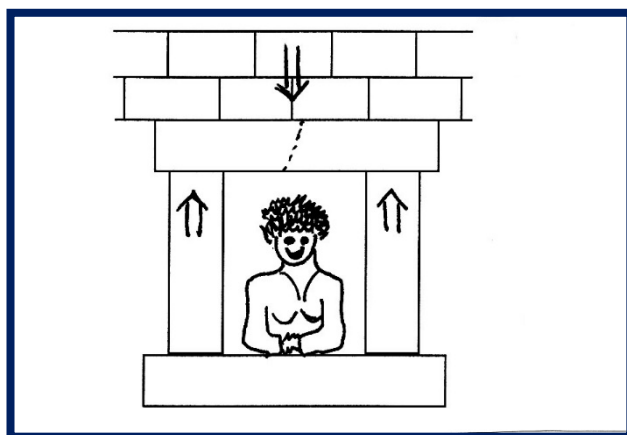
Tipos de esfuerzos en edificios



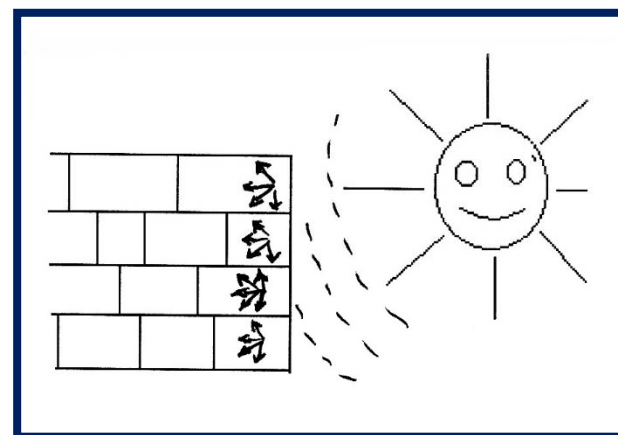
Compresivos



Distensivos (Tracción)



Flexión



Térmicos

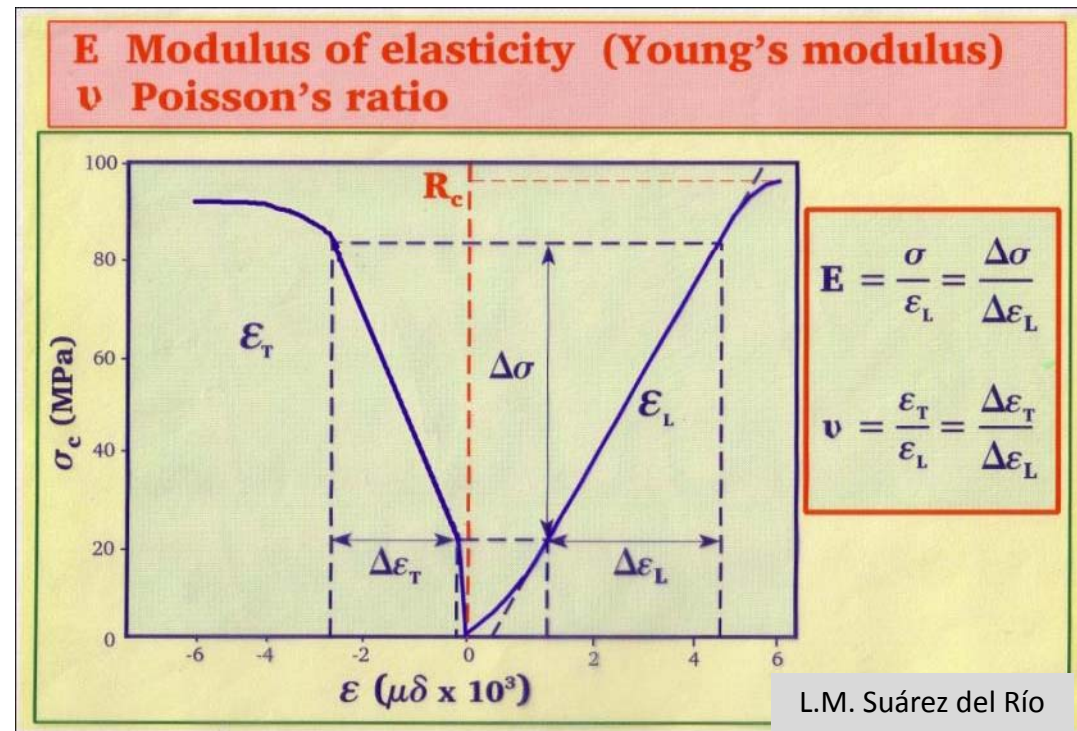
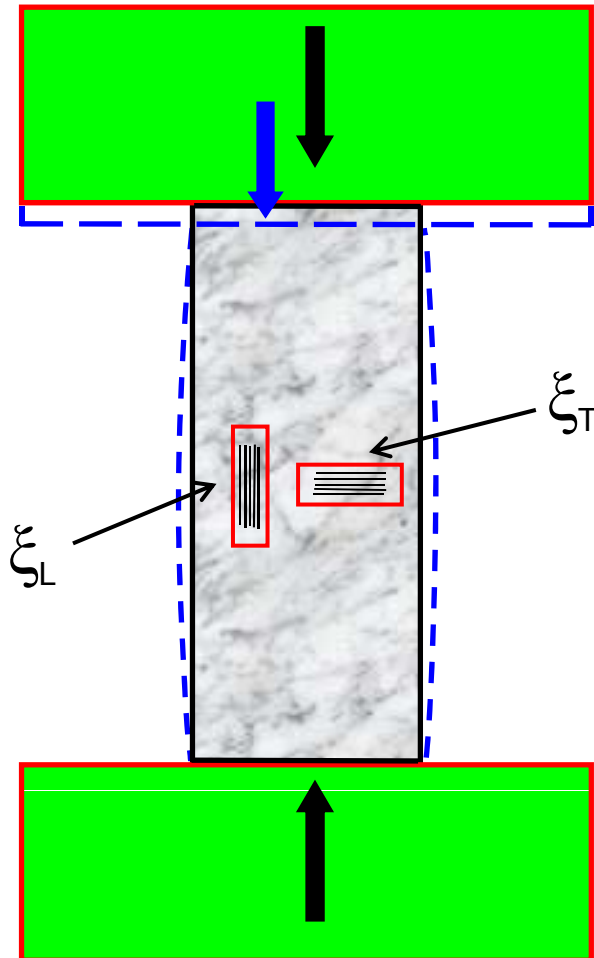
L.M. Suárez del Río

PROPIEDADES MECÁNICAS DE VOLUMEN

UNE-EN 1926. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial.

UNE-EN 14580. Determinación del módulo de elasticidad estático.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN



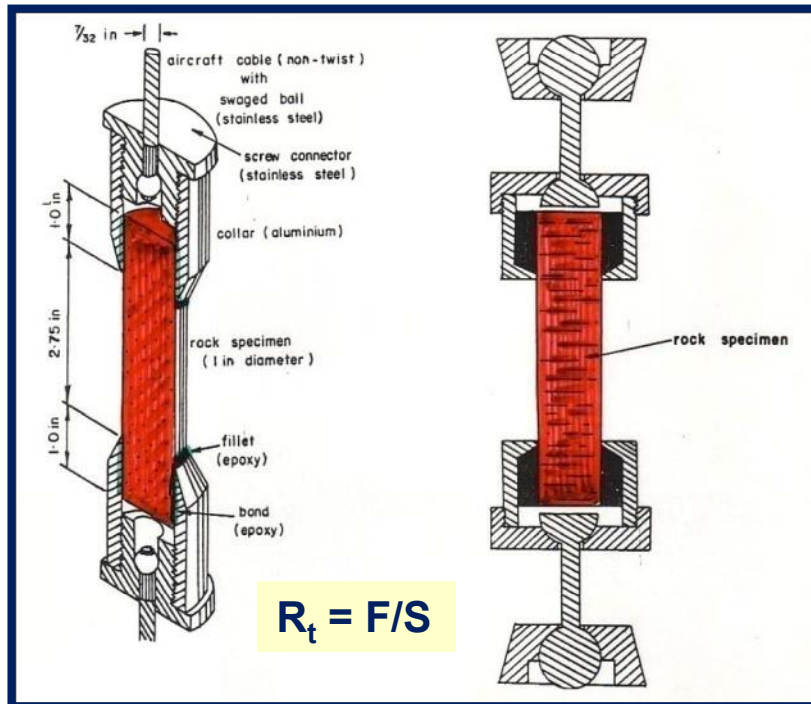
$$R_c = \frac{F}{S}$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_L} = \frac{F/S}{\Delta L/L}$$

$$\nu = \frac{\Delta\epsilon_T}{\Delta\epsilon_L}$$

PROPIEDADES MECÁNICAS DE VOLUMEN

RESISTENCIA A LA TRACCIÓN



Rock Tests- Tensile Strength

Ensayo brasileño

The diagram shows a Brazilian disc test setup. A disc of rock is placed between two guide pins in clearance holes. A load is applied to the top of the disc, which has a spherical seat. The disc is 20 mm thick. The formula for tensile strength is given as $R_t = \frac{2\sigma}{\pi \cdot h \cdot d}$. The text below the formula defines the variables: R_t = Resistencia tracción, σ = Carga de rotura, h = Altura del disco, and d = Diámetro del disco.

$R_t = \frac{2\sigma}{\pi \cdot h \cdot d}$

R_t = Resistencia tracción
 σ = Carga de rotura
 h = Altura del disco
 d = Diámetro del disco

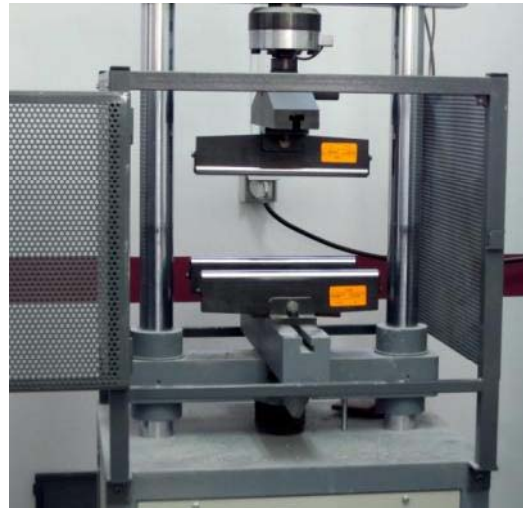
L.M. Suárez del Río

PROPIEDADES MECÁNICAS DE VOLUMEN

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

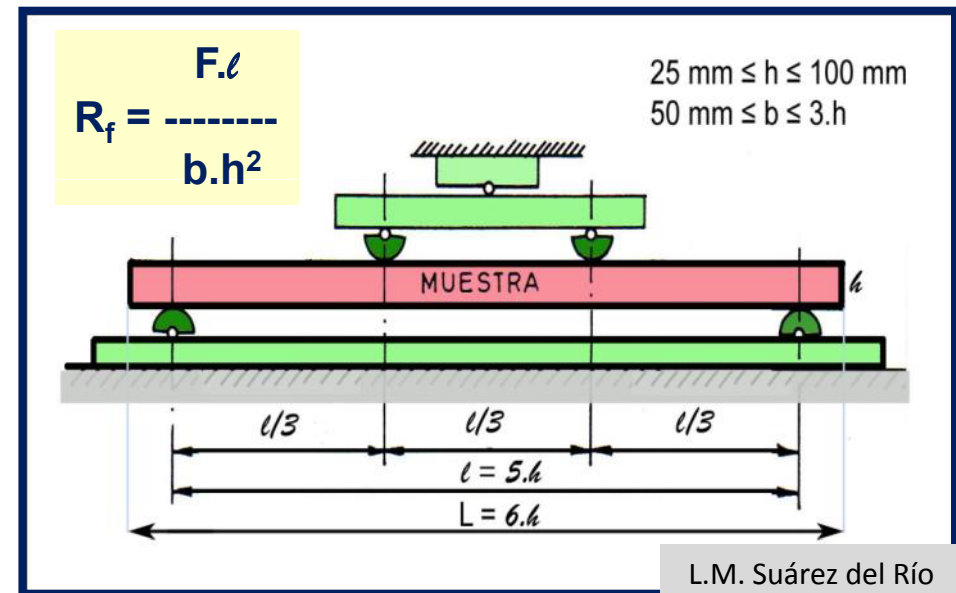
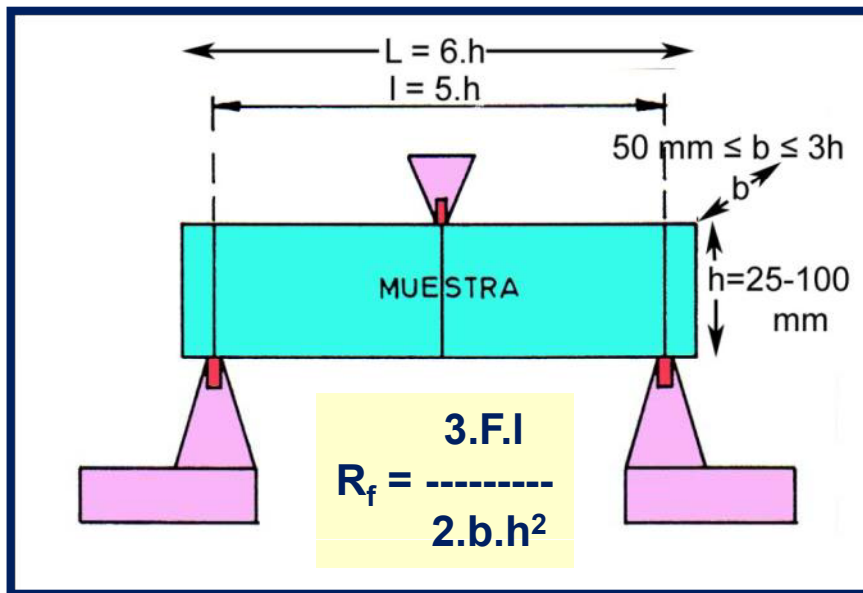
CARGA CONCENTRADA

UNE-EN 12372. Determinación de la resistencia a la flexión bajo carga concentrada.



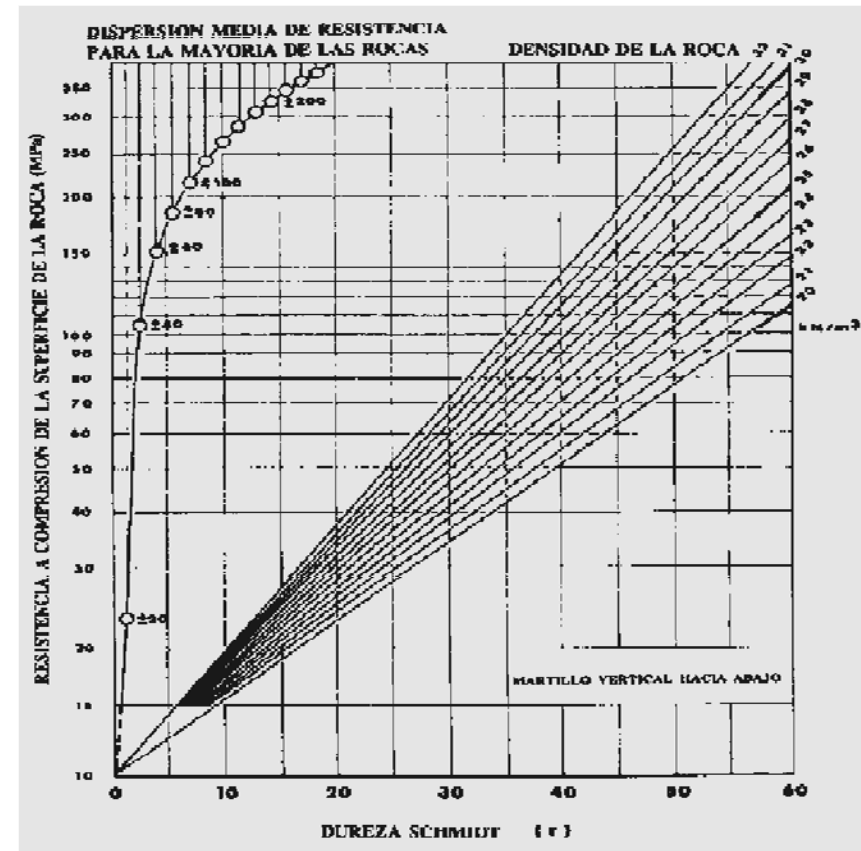
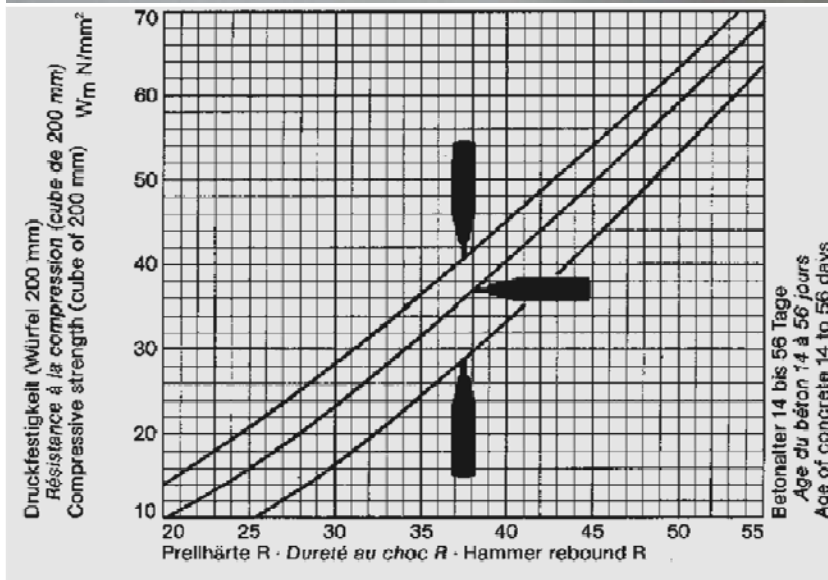
MOMENTO CONSTANTE

UNE-EN 13161. Determinación de la resistencia a la flexión a momento constante.



PROPIEDADES MECÁNICAS DE VOLUMEN

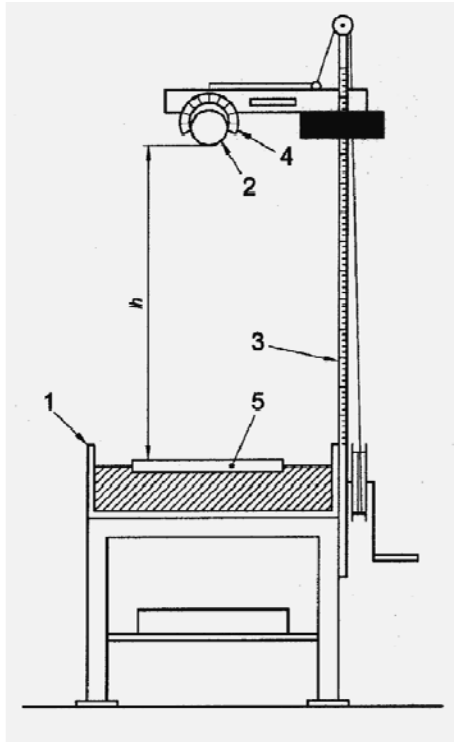
RESISTENCIA AL REBOTE



PROPIEDADES MECÁNICAS DE VOLUMEN

UNE-EN 14158. Determinación de la energía de rotura.

RESISTENCIA AL CHOQUE



Energía de rotura

$$W = m \cdot g \cdot h$$

W = energía de rotura (julios)

m = masa de la bola de acero (kg)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

h = altura de rotura (m, 2 decimales)



Bola de acero: 1 kg
Loseta: 20 x 20 x 3 cm

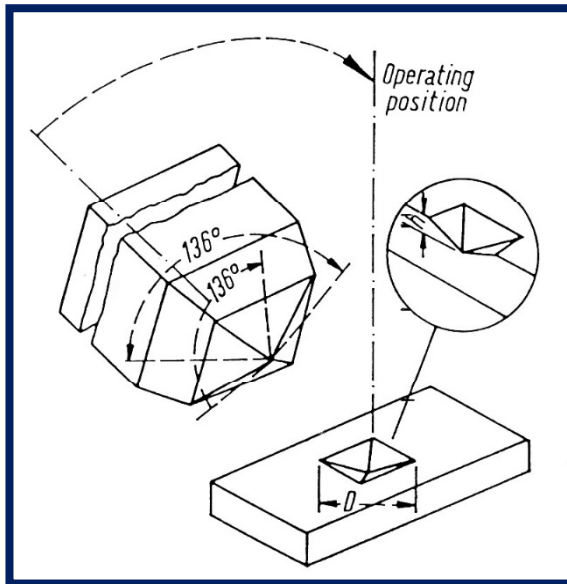


PROPIEDADES MECÁNICAS DE SUPERFICIE

UNE-EN 14205. Determinación de la dureza Knoop

DUREZA

Vickers



$$H_{VD} = \frac{0.9272 \times P}{S} = \frac{1,8544 \times P}{d^2}$$

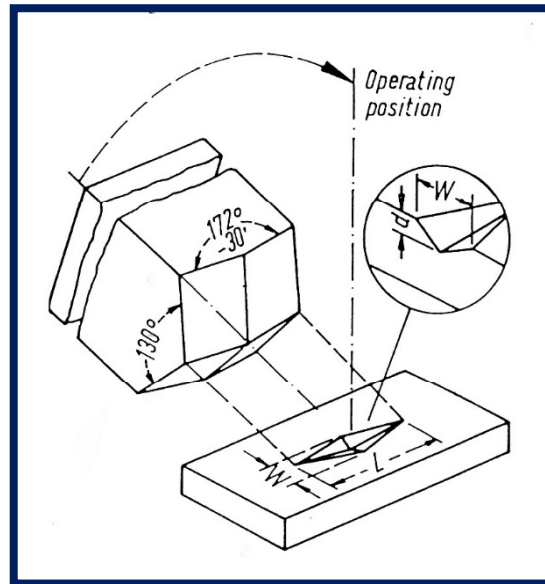
H_{VD} = dureza Vickers (Kg/mm²)

P = carga aplicada (g)

S = área proyectada de la huella

d = diagonal de la huella (μm)

Knoop

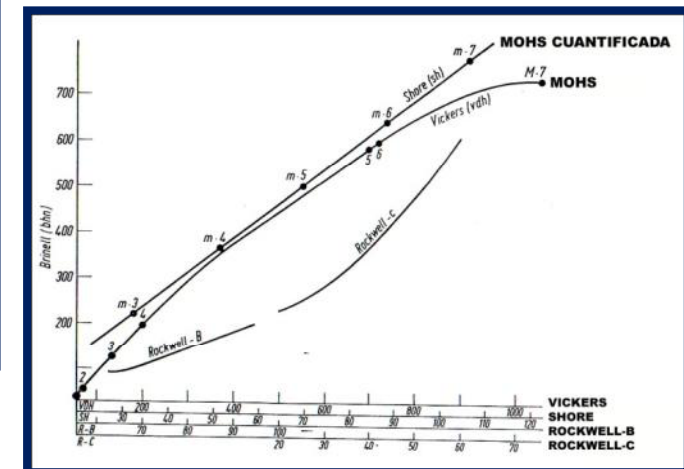


$$H_K = P / \text{área huella}$$

- P = 0.2 a 4 Kg

- Permite ver anisotropías

- $H_K \approx H_{VD}$



Correlación entre diversos tipos de durezas (Winkler, 1973)

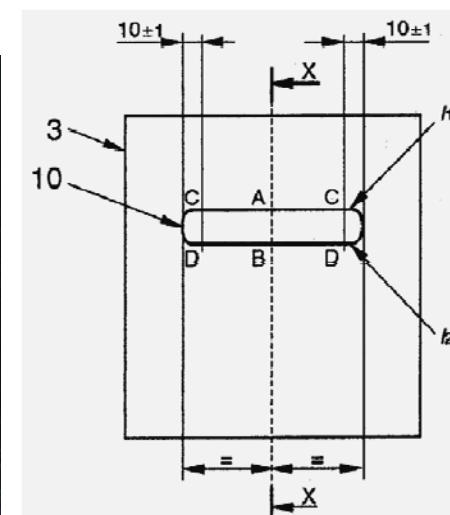
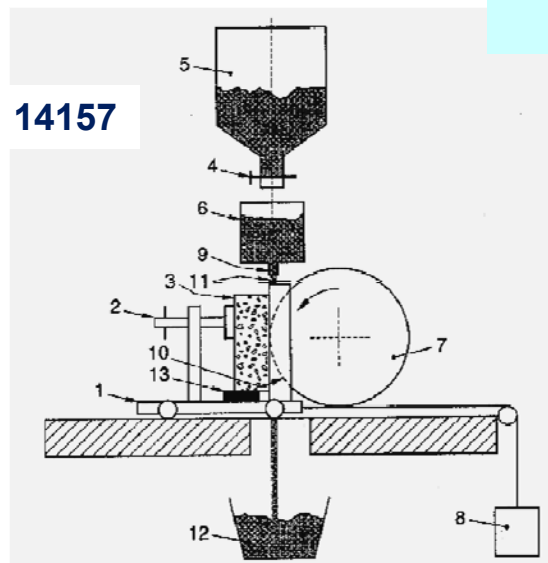


PROPIEDADES MECÁNICAS DE SUPERFICIE

UNE-EN 14157. Determinación de la resistencia a la abrasión

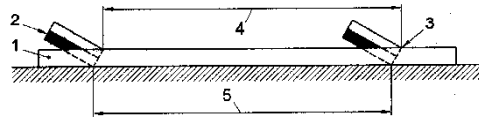
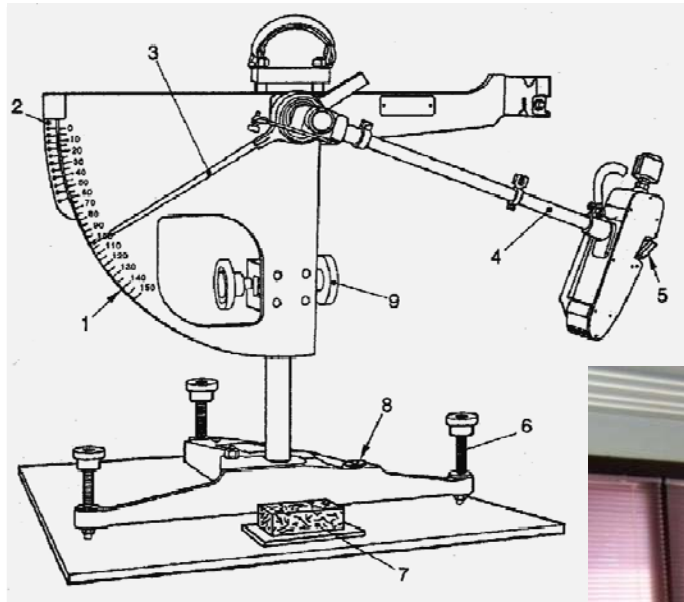
RESISTENCIA A LA BRASIÓN

Método del disco de abrasión ancho

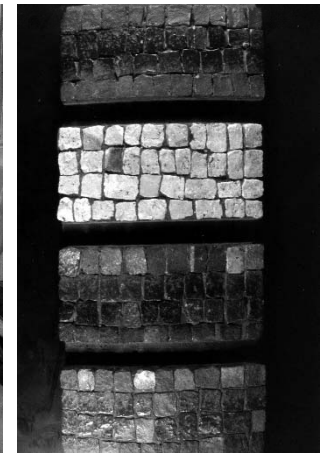
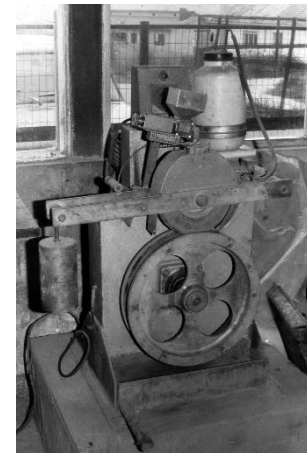
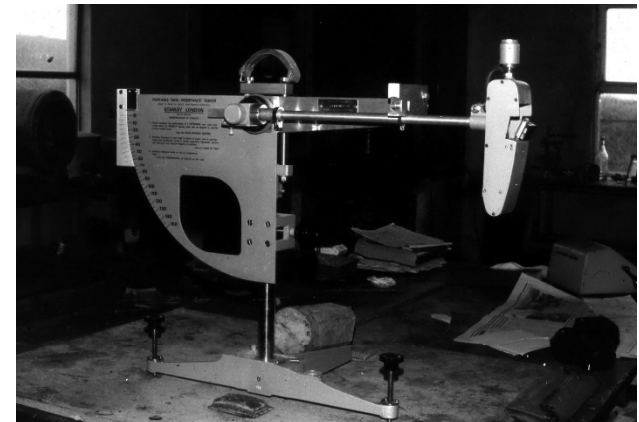


PROPIEDADES MECÁNICAS DE SUPERFICIE

RESISTENCIA AL DESLIZAMIENTO



UNE-EN 14231. Determinación de la resistencia al deslizamiento mediante el péndulo de fricción.

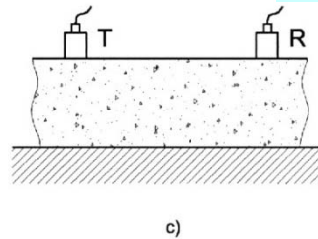
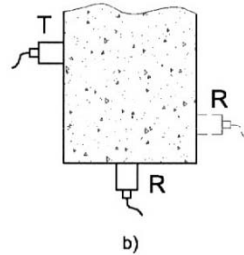
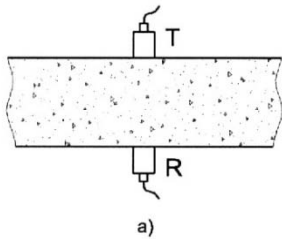


PROPIEDADES DINÁMICAS

UNE-EN 14146

UNE-EN 14579

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ONDAS



Leyenda

T Emisor
R Receptor

a) Transmisión directa
b) Transmisión semidirecta
c) Transmisión indirecta o de superficie

UNE-EN 14579. Determinación de la velocidad de propagación del sonido.

UNE-EN 14146. Determinación del módulo de elasticidad dinámico.



$$V = L / T$$

V = velocidad del impulso (km/s)

L = longitud del recorrido (mm)

T = tiempo necesario (µm)

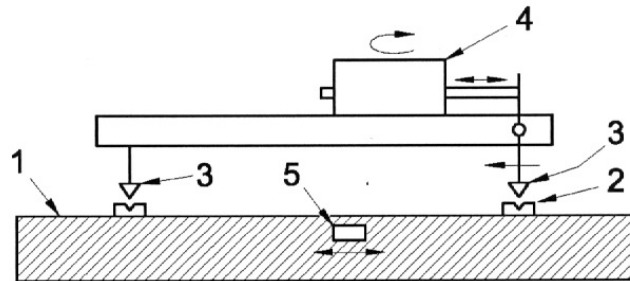
Análisis experimental mediante ultrasonidos para la determinación de la resistencia de la piedra.



PROPIEDADES TERMICAS

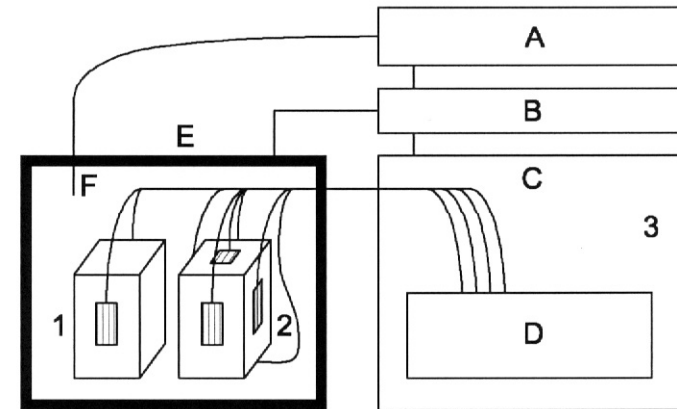
UNE-EN 14581. Determinación del coeficiente lineal de dilatación térmica.

COEFICIENTE DE DILATACIÓN TÉRMICA



Leyenda

- 1 Probeta
- 2 Remache fijado a la probeta
- 3 Puntas de medición del dispositivo, uno de ellos es móvil
- 4 Dispositivo mecánico de medición
- 5 Dispositivo de medición de temperatura



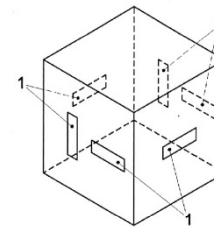
- 1 Muestra de referencia con un par de galgas extensométricas pegadas a ella
- 2 Probeta con tres pares de galgas extensométricas pegadas a ella
- 3 Unidad de control de puente Wheatstone
- A Control de la unidad de calentamiento
- B Sistema de adquisición de datos
- C Caja de terminales
- D Resistencia fija
- E Unidad de calentamiento
- F Sensor de temperatura

$$\epsilon = \Delta L / L_0$$

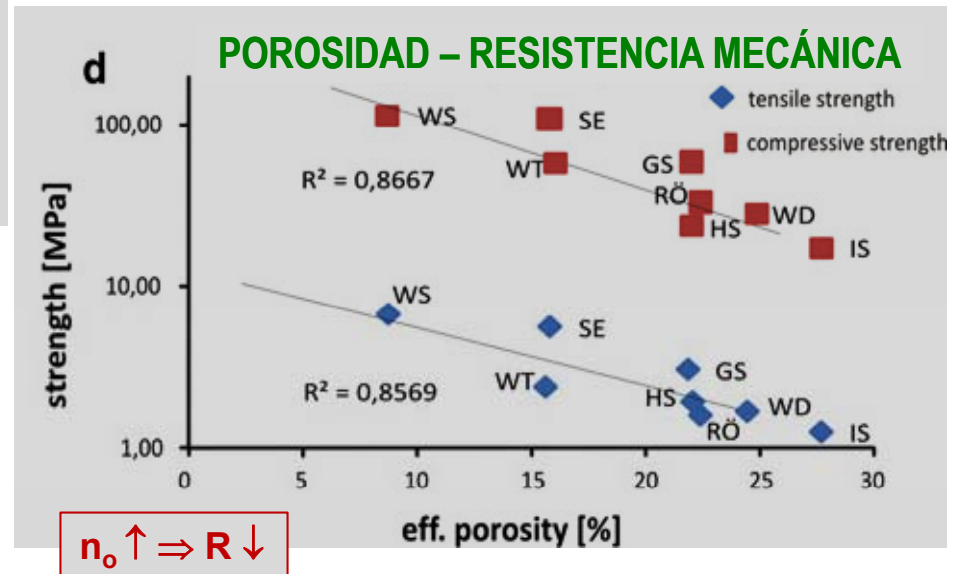
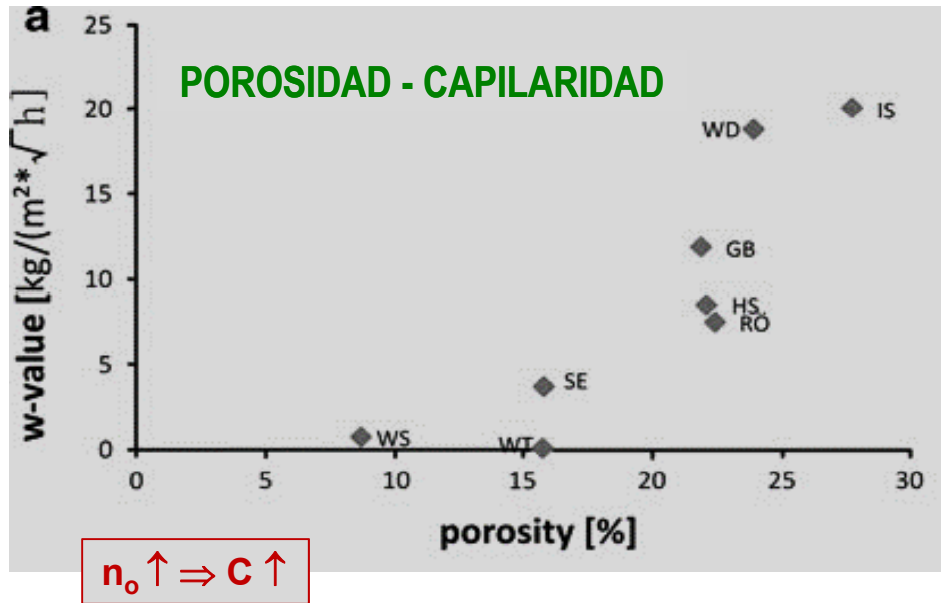
ϵ = expansión lineal térmica en 10^{-6} (mm/mm)

ΔL = cambio de longitud de la probeta (mm)

L_0 = longitud inicial de la probeta a $20 \pm 0,5$ °C (mm)



RELACIONES: Porosidad - Propiedades físicas

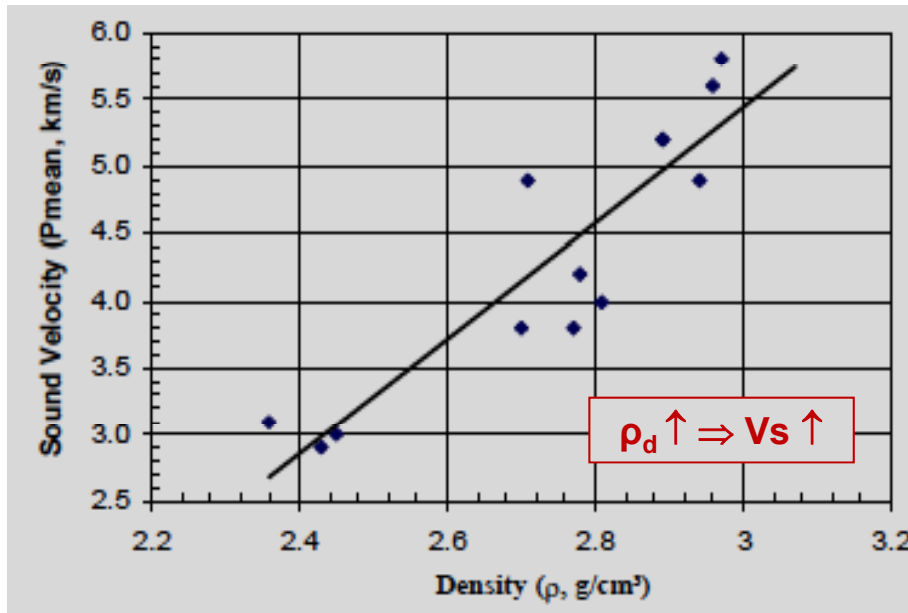


► Stück H., Siegesmund S., Rüdric J. (2011). *Weathering behaviour and construction suitability of dimension stones from the Drei Gleichen area (Thuringia, Germany)*. Environ Earth Sci (2011) 63:1763–1786

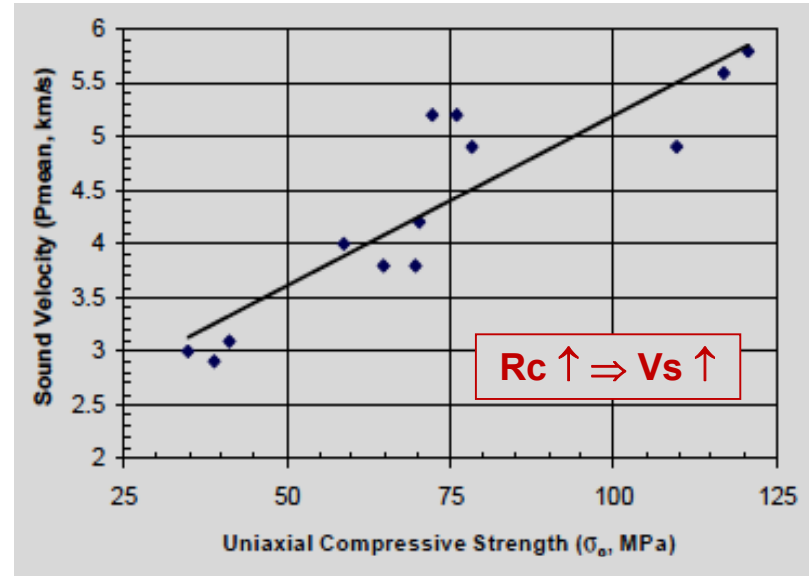
RELACIONES: Densidad - Resistencia - Velocidad de propagación de ondas

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y VELOCIDAD DE ONDAS

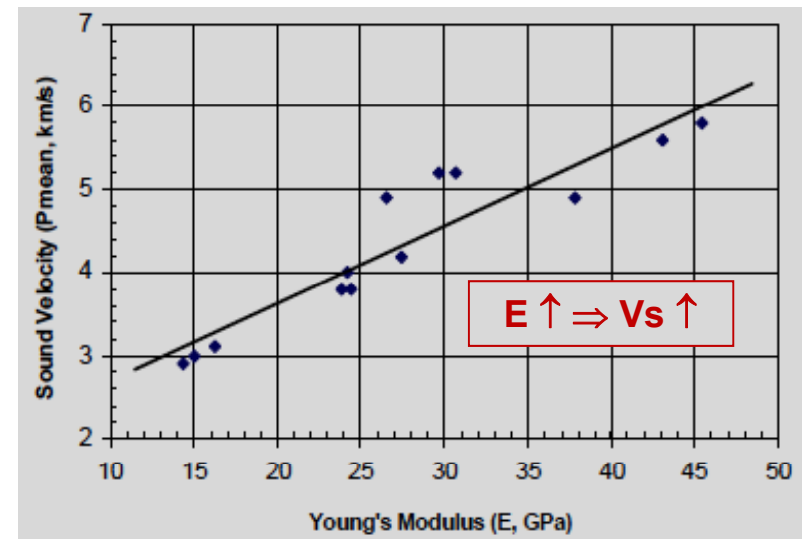
DENSIDAD Y VELOCIDAD DE ONDAS



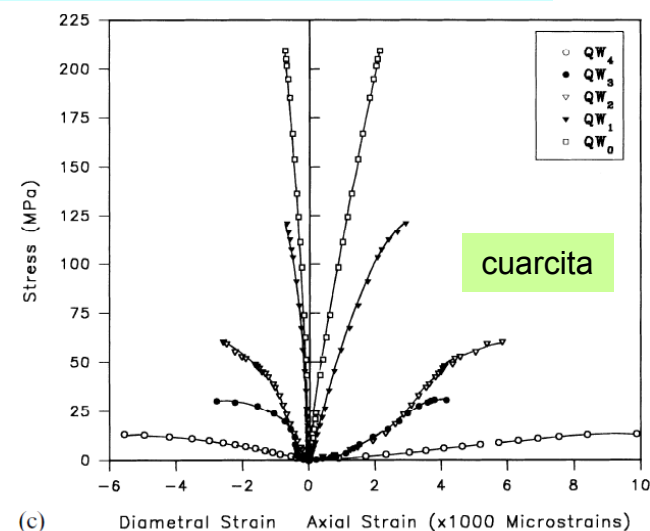
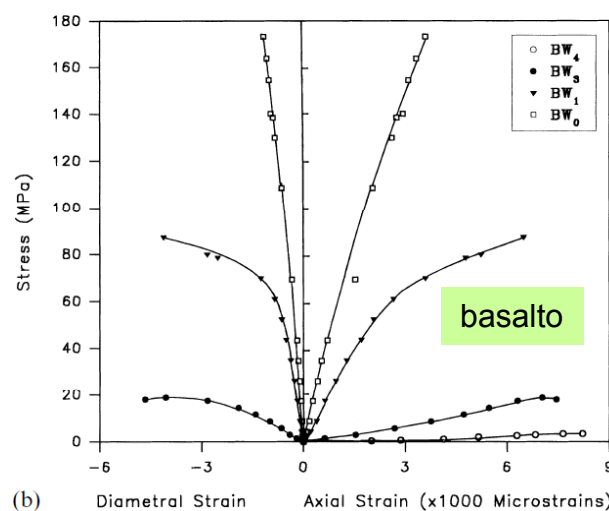
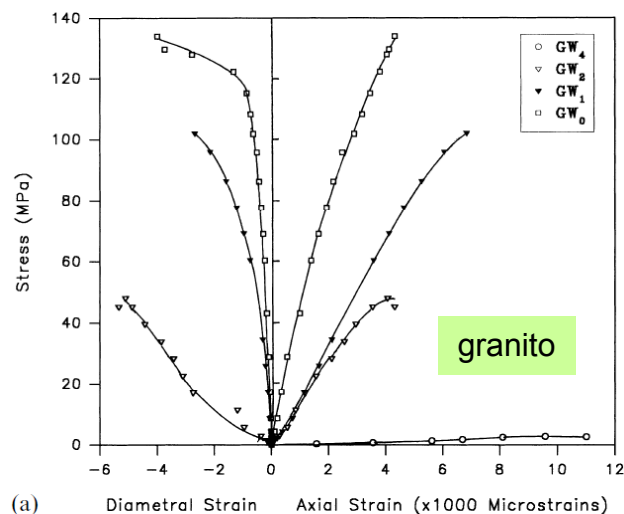
► Yasar E. & Y. Erdogan Y. (2004). *Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 41, 871–875.



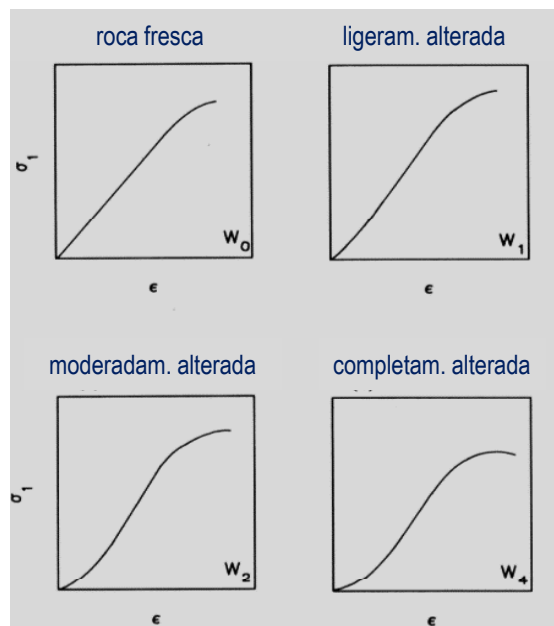
MÓDULO DE YOUNG Y VELOCIDAD DE ONDAS



RELACIONES: Resistencia mecánica – Grado de alteración



Curvas esfuerzo-deformación en distintas variedades de rocas, sin alterar (w_0) y alteradas en grado creciente (w_1, w_2, w_3, w_4), en granito, basalto y cuarcita.



► Gupta A.S. & Seshagiri Rao K. (2000). *Weathering effects on the strength and deformational behaviour of crystalline rocks under uniaxial compression state*. Engineering Geology 56, 257–274.

