

## PROPIEDADES FÍSICAS DE ROCAS

1

PROPIEDAD      0) Ensayo      ► Método de ensayo: Norma      → *Parámetro determinado*

### DENSIDAD Y POROSIDAD:

- 1) Rocas de composición mineral conocida
  - Determinación teórica      → *Densidad de los granos minerales (densidad real)*
- 2) Rocas con formas geométricas regulares
  - Método del calibre / Método geométrico: ISRM 1979      → *Densidad de la roca seca (densidad aparente)*
- 3) Absorción forzada de agua / Absorción de agua al vacío (Saturación) / Rocas resistentes al agua
  - Saturación al vacío / Método de la pesada hidrostática: UNE-EN 1936: 2007; RILEM 1980      → *Densidad de la roca seca (densidad aparente)*  
→ *Porosidad abierta*
- 4) Rocas con densidad real y aparente conocidas
  - Determinación teórica      → *Porosidad total*

### PROPIEDADES HÍDRICAS:

- 3) Absorción forzada de agua / Absorción de agua al vacío (Saturación)
  - Saturación al vacío. Método de la pesada hidrostática: UNE-EN 1936: 2007; RILEM 1980      → *Contenido en agua en saturación*
- 5) Absorción libre de agua / Absorción de agua a presión atmosférica (Imbibición)
  - Inmersión total en agua: UNE-EN 13755:2001; NORMAL 7/81      → *Contenido en agua (absorción de agua)*  
→ *Grado de saturación*
- 6) Absorción de vapor de agua (Higroscopía)
  - Exposición en ambiente a temperatura y humedad relativa constante      → *Contenido en agua*  
→ *Grado de saturación*
- 7) Desorción de agua (Evaporación)
  - Exposición en ambiente a temperatura y humedad relativa constante: UNE-EN 16322:2013; NORMAL 29/88      → *Contenido en agua*  
→ *Grado de saturación*
- 8) Absorción de agua por capilaridad (Succión capilar)
  - Superficie horizontal en contacto con el agua: UNE-EN 15801:2011; UNE-EN 1925:1999; NORMAL 11/85      → *Coefficiente de absorción capilar*  
→ *Coefficiente de penetración capilar*
- 9) Permeabilidad al vapor de agua (Difusividad)
  - Circulación de humedad en permeámetro normalizado: UNE-EN 15803:2013; NORMAL 21/85      → *Coefficiente de permeabilidad al vapor de agua*
- 10) Expansión hídrica (Hinchamiento)
  - Inmersión en agua en cubeta con comparadores: RILEM 1980      → *Coefficiente de dilatación lineal ó de hinchamiento*

## MATERIAL UTILIZADO

Material	Ensayo							
	2	3	5	6	7	8	9	10
- Muestras: cubos 5 x 5 x 5 cm	x	x	x	x	x	x		
- Muestras: lajas 5 x 5 x 1 cm							x	
- Muestras: prismas / cilindros								x
- Calibre: pie de rey (precisión $\geq 0,1$ mm)	x					x	x	x
- Balanza con pesada hidrostática (precisión $\geq 0,01$ g)	x	x	x	x	x	x	x	x
- Horno: para mantener $60 \text{ ó } 105 \pm 5^\circ\text{C}$	x	x	x	x	x	x	x	x
- Contenedores con gel de sílice	x	x	x	x	x	x	x	x
- Reloj con minuterio o cronómetro		x	x	x	x	x	x	x
- Agua desionizada o destilada		x	x	x	x	x	x	x
- Paño húmedo		x	x		x	x		
- Desecador conectado a bomba de vacío		x						
- Contenedores con rejilla			x					
- Bandeja con rejilla				x	x	x		
- Laboratorio que mantenga constante T y Hr				x	x			
- Termómetro e higrómetro				x	x			
- Papel de filtro						x		
- Permeámetros de vapor de agua							x	
- Cámara climática: para mantener $25 \pm 0,5^\circ\text{C}$							x	
- Cubeta con relojes comparadores (precisión $\geq 1\mu\text{m}$ )								x

## NORMAS

- UNE-EN 1936 (2007). Métodos de ensayo para piedra natural.  
Determinación de la densidad real y aparente y de la porosidad abierta y total.
- UNE-EN 13755 (2008). Métodos de ensayo para piedra natural.  
Determinación de la absorción de agua a presión atmosférica.
- UNE-EN 1925 (1999). Métodos de ensayo para piedra natural.  
Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad.
- UNE-EN 15801 (2011). Conservación del patrimonio cultural.  
Determinación de la absorción de agua por capilaridad.
- UNE-EN 16322 (2013). Conservación del patrimonio cultural.  
Determinación de las propiedades de secado.
- UNE-EN 15803 (2013). Conservación del patrimonio cultural.  
Determinación de la permeabilidad al vapor de agua.
- NORMAL 7/81. Assorbimento d'Acqua per Immersione Totale - Capacità di Imbibizione
- NORMAL 11/85 (2ª Ed.). Assorbimento d'Acqua per Capillarità - Coefficiente di Assorbimento Capillare
- NORMAL 21/85. Permeabilità al Vapor d'Acqua
- RILEM (1980). Essais recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évaluer l'efficacité des méthodes de traitement.  
Matériaux et Constructions, Bull. RILEM 13 (75) 216-220.
- ISRM (1979). Suggested methods for determining water content, porosity, density and related properties, and swelling.  
International Journal of Rock Mechanics & Mining Science 16 (2) 141-156

**DENSIDAD DE LOS GRANOS MINERALES** 2

*Determinación teórica*

**Muestra:** ..... **Fecha:** .....

- Observaciones: .....

**Toma de datos:**

- Porcentaje de cada uno de los componentes minerales de la roca: "c<sub>i</sub>"
- Densidad de cada uno de los componentes minerales de la roca: "ρ<sub>i</sub>"

**Cálculos y resultados:**

- Densidad de los granos minerales (densidad real):  $\rho_s = \sum (c_i \times \rho_i) / 100$  (kg/m<sup>3</sup>)

Toma de datos			
Tipo de mineral	Porcent. mineral	Densidad mineral	Porcent x Densidad
Total:			

Tipo de mineral	Densidad mineral (g / cm <sup>3</sup> )	
cuarzo / ópalo	2.65	2.00
ortosa / anortocl.	2.56	2.58
albita / anortita	2.63	2.76
horblenda / augita	3.20	3.30
biotita / clorita	3.00	3.00
moscovita / illita	2.83	2.80
montmo. / caolin.	2.5	2.60
goethita / limonita	4.30	3.80
calcita / aragon.	2.71	2.85
dolomita / anker.	2.86	3.00
yeso / anhidrita	2.32	2.96

Unidad

Resultado	
- Densidad de los granos minerales: ρ <sub>s</sub>	(kg / m <sup>3</sup> )

**DENSIDAD DE LA ROCA SECA**

*Método geométrico (Norma: ISRM 1979)*

**Condiciones de ensayo y toma de datos:**

- Masa seca: "M<sub>0</sub>" (secado de las muestras: T = 60°C, t >24 horas, hasta masa cte.)
- Longitudes: "L<sub>1</sub>", "L<sub>2</sub>" y "L<sub>3</sub>" (valor medio de las 4 aristas en las 3 direcciones)

**Cálculos y resultados:**

- Volumen de un paralelepipedo: "V<sub>t</sub>" = L<sub>1</sub> x L<sub>2</sub> x L<sub>3</sub>
- Densidad de la roca seca (densidad aparente): "ρ<sub>d</sub>" = M<sub>0</sub> / V<sub>t</sub>
- Calcular el valor medio y la desviación típica

Toma de datos								
Unidad	Muestra	Muestra	Muestra	Muestra	Muestra	Muestra		
	.....	.....	.....	.....	.....	.....		
Masa seca: M <sub>0</sub>	(g)							
Longitud: L <sub>1</sub>	(mm)							
Longitud: L <sub>2</sub>	(mm)							
Longitud: L <sub>3</sub>	(mm)							
Volumen: V <sub>t</sub>	(mm <sup>3</sup> )							
							Valor medio	Desviac. típica

Resultado								
- Densidad roca seca: ρ <sub>d</sub>	(kg / m <sup>3</sup> )							

## ABSORCIÓN DE AGUA AL VACÍO: SATURACIÓN

### DENSIDAD DE LA ROCA SECA / POROSIDAD ABIERTA / CONTENIDO EN AGUA EN SATURACIÓN

*Método de la pesada hidrostática / Saturación al vacío (Norma: UNE-EN 1936:2007; RILEM 1980)*

**Condiciones de ensayo y toma de datos:**

- Masa seca: "M<sub>o</sub>" (secado de las muestras: T = 60°C, t >24 horas, hasta masa cte.)
- Masa saturada: "M<sub>s</sub>" (saturación: vacío seco 1 día + vacío en agua 1 día + en agua 1 día)
- Masa hidrostática: "M<sub>h</sub>" (sumergidas las muestras en agua)

**Cálculos y resultados:**

- Densidad de la roca seca (densidad aparente):  $\rho_d = M_o / V_t$                        $\rho_d = (M_o / (M_s - M_h)) \times 1000$
- Porosidad abierta (accesible al agua):  $n_o = (V_a / V_t) \times 100$                        $n_o = ((M_s - M_o) / (M_s - M_h)) \times 100$
- Contenido en agua en saturación:  $w_s = ((M_{agua}) / M_o) \times 100$                        $w_s = ((M_s - M_o) / M_o) \times 100$
- Calcular el valor medio (media aritmética) y la desviación típica de cada parámetro

	Unidad	Muestra .....	Muestra .....	Muestra .....	Muestra .....	Muestra .....	Muestra .....			
<b>Toma de datos</b>										
Masa seca: M <sub>o</sub>	(g)									
Masa saturada: M <sub>s</sub>	(g)									
Masa hidrostática: M <sub>h</sub>	(g)									
<b>Resultados</b>								Valor medio	Desviac. típica	Valor medio <sup>(1)</sup>
- Densidad roca seca: $\rho_d$	(kg / m <sup>3</sup> )									
- Porosidad abierta: n <sub>o</sub>	(%)									
- Cont. agua en satur.: w <sub>s</sub>	(%)									

<sup>(1)</sup> Valor medio de la densidad aproximando a 10 kg/m<sup>3</sup> y de la porosidad y contenido en agua en saturación aproximando al 0,1 %

Nota. Debe cumplirse la relación:  $w_s \times \rho_d = n_o \times \rho_a$  (densidad del agua:  $\rho_a = 1 \text{ g / cm}^3$ )

## POROSIDAD TOTAL

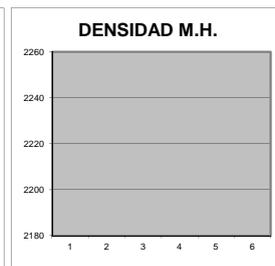
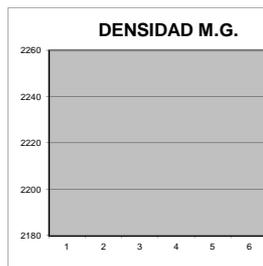
*Determinación teórica*

**Toma de datos:**

- Densidad de los granos minerales (densidad real): " $\rho_s$ "
- Densidad de la roca seca (densidad aparente): " $\rho_d$ "

**Cálculos y resultados:**

- Porosidad total:  $n = ((\rho_s - \rho_d) / \rho_s) \times 100$



Unidad

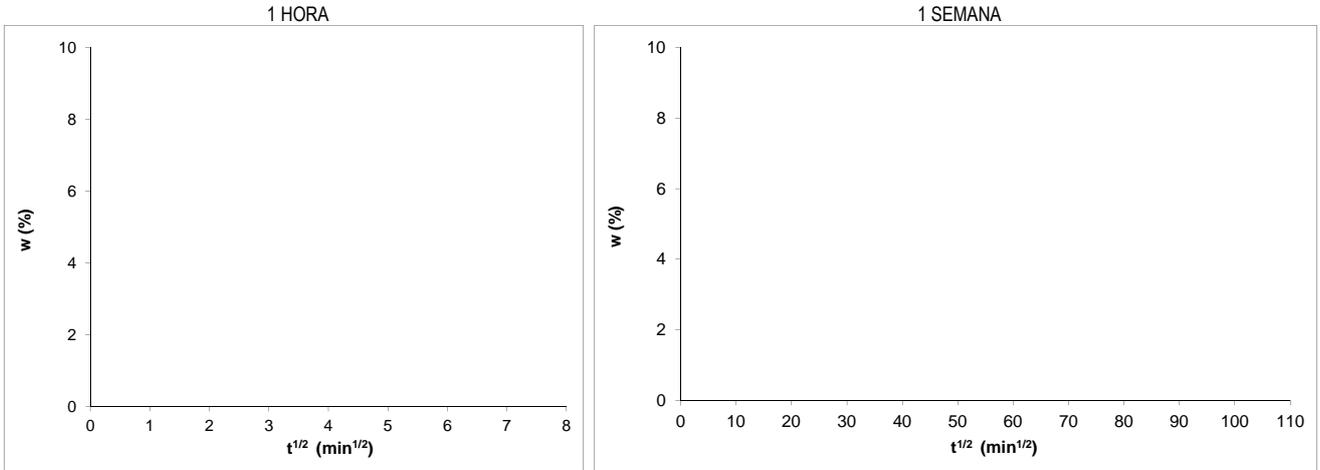
<b>Toma de datos</b>		
Densidad de granos minerales: $\rho_s$	(kg / m <sup>3</sup> )	
Densidad de la roca seca: $\rho_d$	(kg / m <sup>3</sup> )	
<b>Resultado</b>		
- Porosidad total: n	(%)	
- Porosidad abierta: n <sub>o</sub>	(%)	
- Porosidad cerrada: n <sub>c</sub>	(%)	



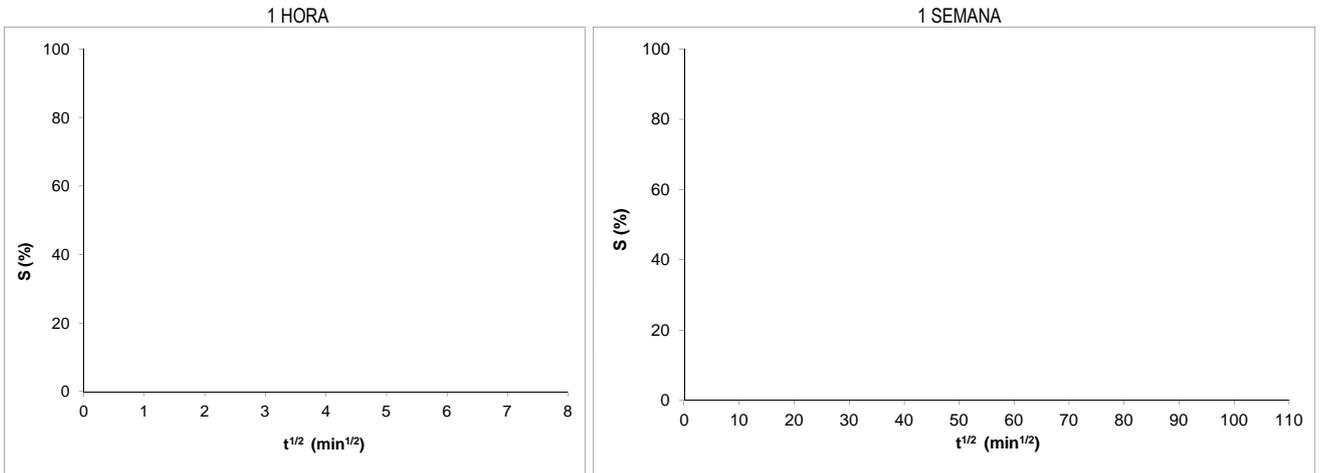
Representaciones gráficas: "Curvas de absorción libre de agua"

- Contenido en agua (w), en función del tiempo ( $\sqrt{t}$ ): a) Tiempo corto ( $\approx 1$  hora) y b) Tiempo largo ( $\approx 1$  semana).
- Grado de saturación (S), en función del tiempo ( $\sqrt{t}$ ): a) Tiempo corto ( $\approx 1$  hora) y b) Tiempo largo ( $\approx 1$  semana).

CONTENIDO EN AGUA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO



GRADO DE SATURACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO



Resultados obtenidos:

- Observar cambios de comportamiento en la curva completa (tiempo largo).
- Determinar gráficamente los parámetros indicados para cada muestra.
- Calcular el valor medio y la desviación típica de cada parámetro.

Resultados							
Unidad	Muestra ....	Muestra .....	Muestra ...	Muestra .....		Valor medio	Desviac. típica
<b>Contenido en agua "w"</b>							
- a la hora de ensayo <sup>(1)</sup> : "w <sub>1h</sub> "	(%)						
- a los dos días de ensayo: "w <sub>2d</sub> "	(%)						
- a los siete días <sup>(2)</sup> : "w <sub>7d</sub> "	(%)						
<b>Grado de saturación "S"</b>							
- a la hora de ensayo: "S <sub>1h</sub> "	(%)						
- a los dos días de ensayo: "S <sub>2d</sub> "	(%)						
- a los siete días: "S <sub>7d</sub> "	(%)						

<sup>(1)</sup> Índice de vacíos (según la norma ISRM 1979).

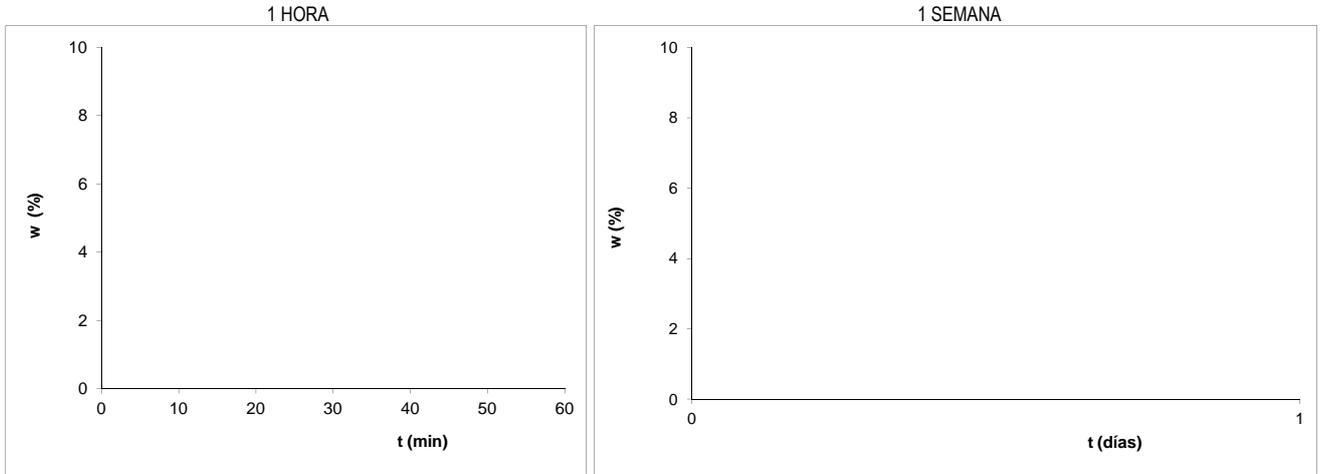
<sup>(2)</sup> Capacidad de absorción o Coeficiente de imbibición (según la norma NORMAL 7/81): si las variaciones de masa para intervalos de 24 horas son inferiores a 0,1 %



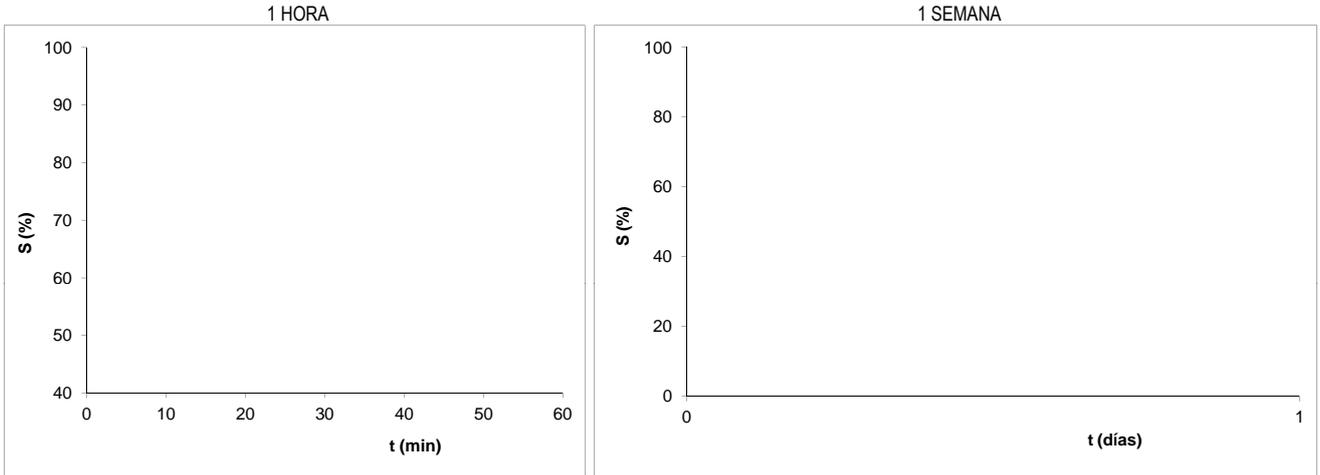
Representaciones gráficas: "Curvas de evaporación"

- Contenido en agua (w), en función del tiempo (t): a) Tiempo corto (≈ 1 hora) y b) Tiempo largo (≈ 1 semana).
- Grado de saturación (S), en función del tiempo (t): a) Tiempo corto (≈ 1 hora) y b) Tiempo largo (≈ 1 semana).

CONTENIDO EN AGUA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO



GRADO DE SATURACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO



Resultados obtenidos:

- Observar cambios de comportamiento en la curva completa (1 semana).
- Determinar gráficamente los parámetros indicados para cada muestra.
- Calcular el valor medio y la desviación típica de cada parámetro.

Resultados							
Unidad	Muestra	Muestra	Muestra	Muestra		Valor medio	Desviac. típica
	....	.....	...	.....			
<b>Contenido en agua "w"</b>							
- a la hora de ensayo: "w <sub>1h</sub> "	(%)						
- a los días de ensayo: "w <sub>2d</sub> "	(%)						
- a los siete días <sup>(1)</sup> : "w <sub>7d</sub> "	(%)						
<b>Grado de saturación "S"</b>							
- a la hora de ensayo: "w <sub>1h</sub> "	(%)						
- a los días de ensayo: "w <sub>2d</sub> "	(%)						
- a los siete días <sup>(1)</sup> : "w <sub>7d</sub> "	(%)						

<sup>(1)</sup> Capacidad higroscópica: agua retenida en condiciones de equilibrio para un ambiente dado.

**ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD: SUCCIÓN CAPILAR** 5

*Superficie horizontal en contacto con agua (Normas: UNE-EN 1925:1999; CNR-ICR NORMAL 11/85)*

**Muestra:** ..... **Fecha:** .....

- Observaciones: .....  
Orientación: .....

**Datos previos:**

- Lados de la base:  $L_1$  y  $L_2$  (tomar la media de cuatro valores por lado)

**Condiciones del ensayo y toma de datos:**

- Masa seca:  $M_0$  (dato inicial para  $t = 0$ )
- Colocar sobre agua desionizada (nivel del agua = base de la muestra)
- Masa en función del tiempo:  $M_t$  (tomar  $\Delta\sqrt{t} = \text{cte}$ ; para  $t = 0$ ,  $M_t = M_0$ )
- Altura ascendida por el agua en función del tiempo:  $H_t$  (tomar  $\Delta\sqrt{t} = \text{cte}$ ; para  $t = 0$ ,  $H_t = 0$ )

**Cálculos:**

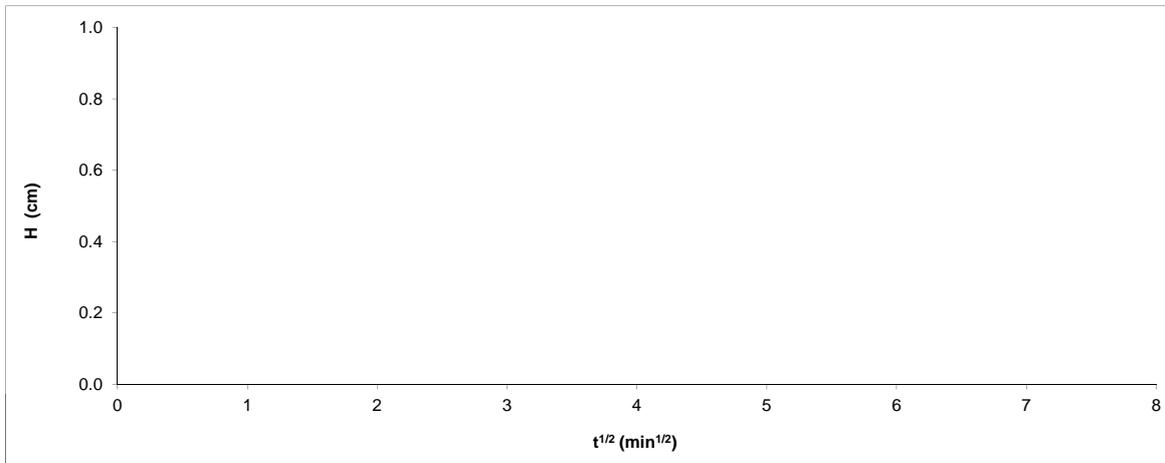
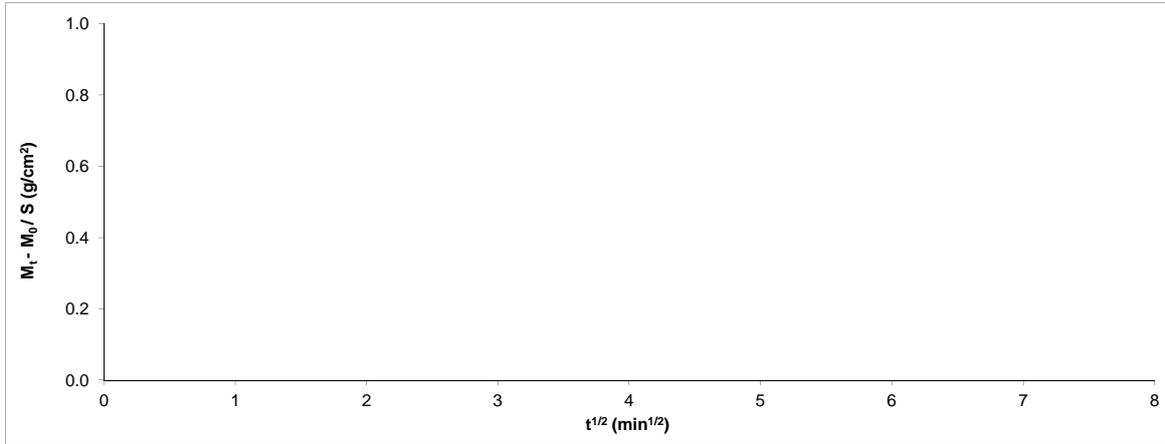
- Superficie de la base:  $S = L_1 \times L_2$
- Ganancia de masa por unidad de superficie en función del tiempo:  $(\Delta M/S)_t = (M_t - M_0) / S$
- Coeficiente de absorción capilar:  $C = (\Delta M/S) / \sqrt{t}$
- Coeficiente de penetración capilar:  $A = H / \sqrt{t}$

Toma de datos		Unidad	Muestra ....	Muestra .....	Muestra ...	Muestra .....
Longitud de los lados:	$L_1$	(cm)				
	$L_2$	(cm)				
Superficie de las muestras: S		(cm <sup>2</sup> )				

Tiempo			Masa de la muestra $M_t$ (g)				Altura ascendida $H_t$ (cm)				Incremento masa / superficie $\Delta M/S$ (g / cm <sup>2</sup> )				
Hora	t (min)	$\sqrt{t}$ (min)	Muestra ....	Muestra .....	Muestra ...	Muestra .....	Muestra ....	Muestra .....	Muestra ...	Muestra .....	Muestra ....	Muestra .....	Muestra ...	Muestra .....	Media
	0	0													
	1	1													
	4	2													
	9	3													
	16	4													
	25	5													
	36	6													
	49	7													
	64	8													
	81	9													

**Representaciones gráficas:** "Curvas de capilaridad"

- Absorción capilar ( $\Delta M/S$ ), en función del tiempo ( $\sqrt{t}$ ).
- Penetración o ascenso capilar (H), en función del tiempo ( $\sqrt{t}$ ).



**Resultados obtenidos:**

- Observar que el comportamiento es lineal inicialmente.
- El coeficiente es la pendiente de dicho tramo recto inicial.
- Determinar gráficamente los coeficientes indicados para cada muestra.
- Calcular también el valor medio y la desviación típica de cada parámetro.

Resultados:									
Unidad	Fuente Norma	Factor	Muestra ....	Muestra .....	Muestra ...	Muestra .....		Valor medio	Desviac. típica
<b>Coefficiente de absorción capilar "C"</b>									
- "C" (g / cm² x min <sup>1/2</sup> )	Inicial								
- "C" (kg / m² x h <sup>1/2</sup> )	Utilizado A	77,46							
- "C" (kg / m² x s <sup>1/2</sup> )	UNE-EN*	1,290							
- "C" (g / m² x s <sup>1/2</sup> )	UNE-EN**	1291							
- "C" (g / cm² x s <sup>1/2</sup> )	NORMAL	0,1291							
<b>Coefficiente de penetración capilar "A"</b>									
- "A" (cm / min <sup>1/2</sup> )	Inicial								
- "A" (cm / h <sup>1/2</sup> )	Utilizado A	7,746							
- "A" (cm / s <sup>1/2</sup> )	UNE-EN*	0,1291							
- "A" (mm / s <sup>1/2</sup> )		1,291							
- "A <sub>T</sub> " <sup>(1)</sup> (mm / s <sup>1/2</sup> )		10 / n <sub>0</sub>							

\* UNE-EN 15801 (2011). Conservación del patrimonio cultural \*\* UNE-EN 1925 (1999). Métodos de ensayo para piedra natural.

(1) A partir de "C" puede calcularse el valor teórico de penetración capilar "AT" para un sistema de poros cilíndricos ideales, mediante la expresión:  $A_T \text{ (cm / h}^{1/2}\text{)} \times n_0 \text{ (\%)} = C \text{ (kg / m}^2 \text{ x h}^{1/2}\text{)} \times 10$

**PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA: DIFUSIVIDAD**

**6**

*Circulación de humedad en permeámetro (Norma: CNR-ICR NORMAL 21/85)*

**Muestra:** ..... **Fecha:** .....

- Observaciones: .....

Orientación: .....

**Datos previos:**

- Espesor teórico de las muestras: 1 cm (según la norma).
- Espesor real de las muestras (tomar la media de ocho valores): **e**
- Superficie del permeámetro constante: **S = 0,00159 m<sup>2</sup>** (diámetro 4,5 cm)



**Condiciones del ensayo y toma de datos:**

- Preparar la célula de medida, colocar la muestra y cerrar herméticamente.
- Mantener la temperatura constante durante el ensayo: 25°C (según la norma).
- Masa inicial de la célula (permeámetro + muestra): **M<sub>0</sub>** (dato inicial para t = 0)
- Masa de la célula en función del tiempo: **M<sub>t</sub>** (tomar Δt = 24 horas), (para t = 0, M<sub>t</sub> = M<sub>0</sub>)

**Cálculos:**

- Incremento de masa por unidad de superficie en función del tiempo: **(ΔM/S) = (M<sub>t</sub> - M<sub>0</sub>) / S**
- Coeficiente de permeabilidad al vapor de agua:

. coeficiente simplificado (NORMAL 21/85): **K<sub>v</sub> = | (ΔM/S) / t |** (g / m<sup>2</sup> x 24h)

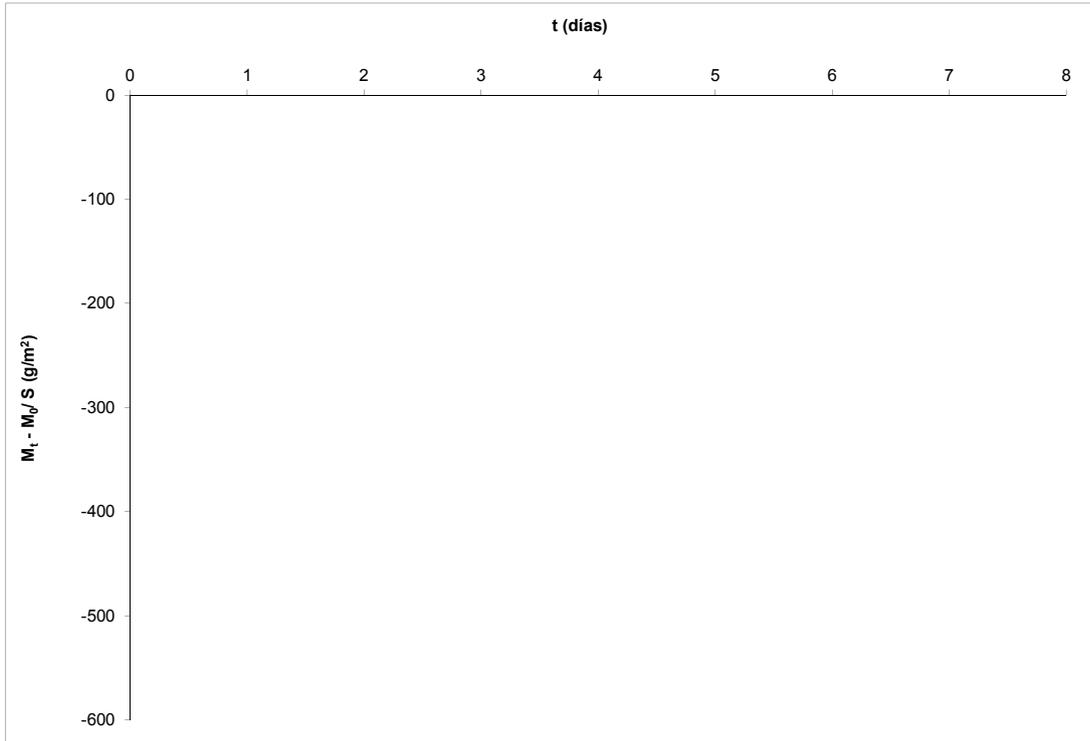
. coeficiente completo (ley de Darcy): **K<sub>v</sub> = | ((ΔM/S) x e) / (t x ΔP) |** (g / m x h x mmHg)

Toma de datos					
	Unidad	Muestra ....	Muestra .....	Muestra ...	Muestra .....
Espesor real: lado 1	(mm)				
Espesor real: lado 2	(mm)				
Espesor real: lado 3	(mm)				
Espesor real: lado 4	(mm)				
Espesor real (valor medio): e	(cm)				
Superficie del permeámetro: S	(m <sup>2</sup> )	0.0016	0.0016	0.0016	0.0016

Tiempo					Masa de la célula M <sub>t</sub> (g)				Incremento masa / superficie ΔM/S (g / m <sup>2</sup> )				
Día	Hora	Hora (decimal)	t (horas)	t (días)	Muestra ....	Muestra .....	Muestra ...	Muestra .....	Muestra ....	Muestra .....	Muestra ...	Muestra .....	Media
			0	0									
				1									
				2									
				3									
				4									
				5									
				6									
				7									
				8									

**Representación gráfica:**

- Incremento de masa por unidad de superficie ( $\Delta M/S$ ), en función del tiempo ( t ).



**Resultados obtenidos:**

- Observar que el comportamiento es lineal: el coeficiente es la pendiente de la recta.
- Determinar gráficamente dicho coeficiente, a la temperatura del ensayo (25°C), para cada muestra.
- El coeficiente de permeabilidad al vapor se obtiene a 25°C y se expresa a 20 °C, de acuerdo con la relación:  

$$Kv(20^\circ C) / P(20^\circ C) = Kv(25^\circ C) / Pv(25^\circ C)$$
- La presión de vapor  $P(20^\circ C) = 17,53$  mmHg y  $P(25^\circ C) = 23,76$  mmHg, entonces:  

$$Kv(20^\circ C) = Kv(25^\circ C) \times 0,7378$$
- Debe corregirse dicho coeficiente teniendo en cuenta el espesor real de las muestras, expresado éste en cm y considerándole un parámetro adimensional (sin intervenir en las unidades):  

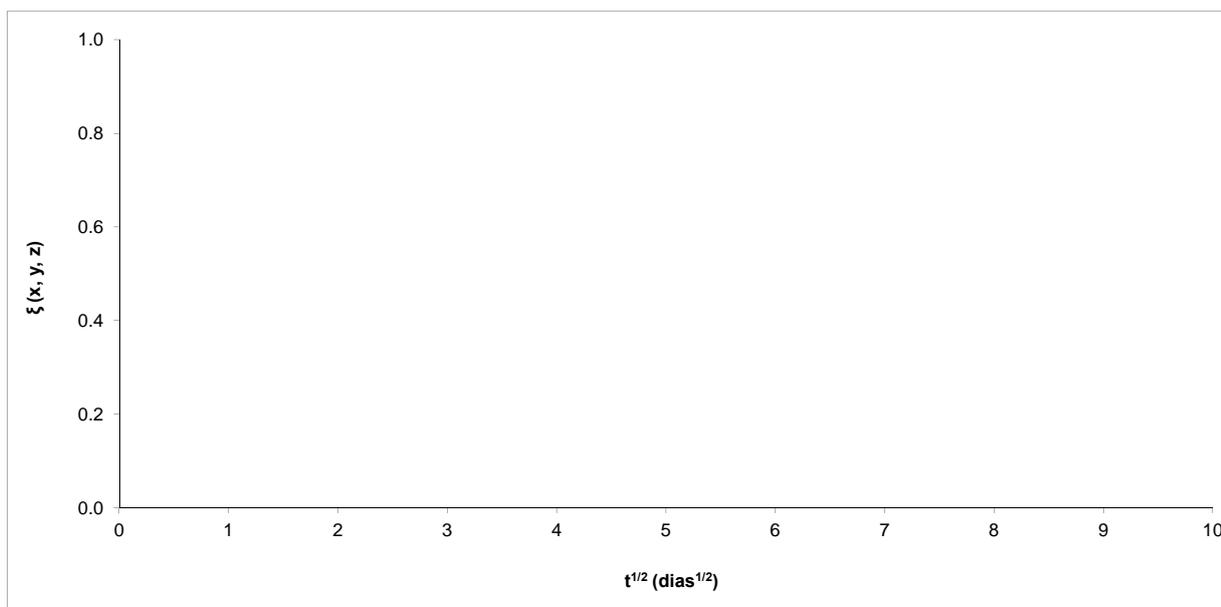
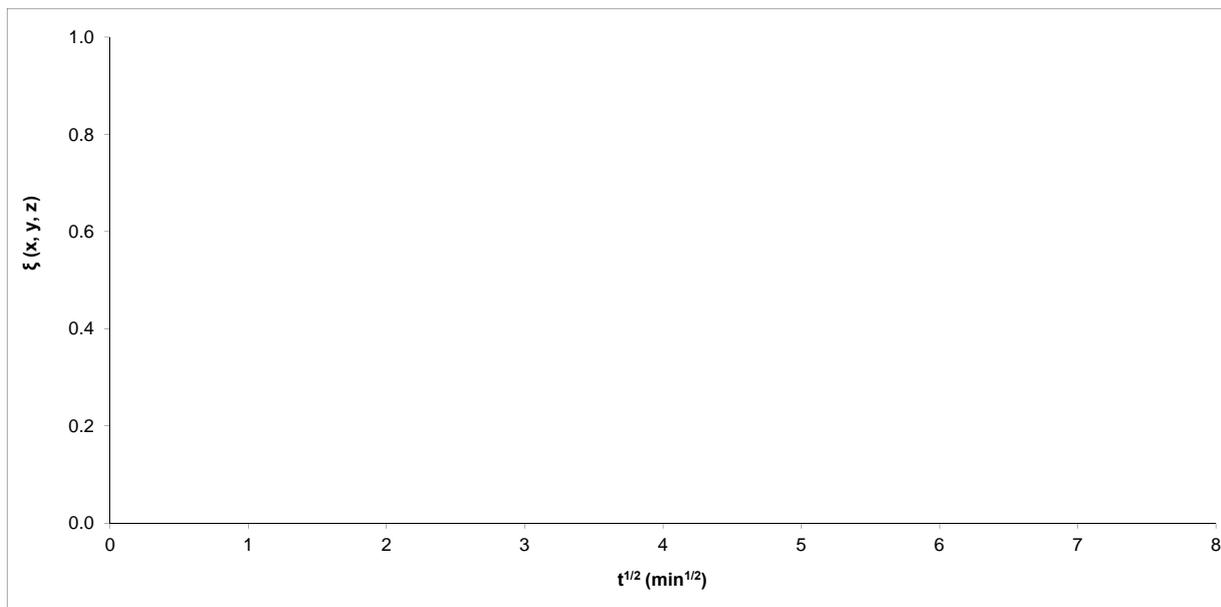
$$Kv^*(20^\circ C) = Kv(20^\circ C) \times e$$
- Finalmente calcular el valor medio y la desviación típica.

Resultados									
	Unidad	Factor	Muestra ....	Muestra .....	Muestra ...	Muestra .....		Valor medio	Desviac. típica
<b>Coefficiente de permeabilidad simplificado a 25°C</b>									
- Kv (25°C)	(g / m <sup>2</sup> x 24h)	---							
<b>Coefficiente de permeabilidad simplificado a 20°C</b>									
- Kv (25°C)	(g / m <sup>2</sup> x 24h)	0.7378							
<b>Coefficiente de permeabilidad simplificado a 20°C y corregido el espesor</b>									
- Kv* (25°C)	(g / m <sup>2</sup> x 24h)	---							



**Representación gráfica: "Curvas de hinchamiento"**

- Dilatación lineal ( $\xi$ ) en función del tiempo ( $\sqrt{t}$ ).



**Resultados obtenidos:**

- Observar cambios de comportamiento en las curvas.
- Determinar gráficamente el coeficiente de hinchamiento: dilatación lineal máxima.

Resultados					
	Unidad	Factor	Dirección X	Dirección Y	Dirección Z
<b>Coefficiente de hinchamiento (RILEM 1980)</b>					
- ( $\xi$ ) <sub>max</sub>	(adimensional)	---			
<b>Coefficiente de hinchamiento (ISRM 1979)</b>					
- ( $\xi$ ) <sub>max</sub>		100			