

# **ALTERACIÓN, DURABILIDAD Y CONSERVACIÓN DE MATERIALES ROCOSOS**

## **Tema 8. VALORACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN**



# VALORACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

## ÍNDICE

- **Introducción:** objetivos de tratamiento, requisitos de los productos, conceptos a valorar, factores implicados, etapa de evaluación, metodología
- **Ensayos de laboratorio:** producto absorbido, propiedades físicas, ensayos de durabilidad
- **Ensayos “in situ”:** propiedades físicas
- **Consideraciones finales**

# VALORACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

## ➤ OBJETIVOS DEL TRATAMIENTO

⇒ *reducir los procesos de deterioro*

### ◆ Consolidación

- Mejorar la cohesión de los componentes
- Mejorar la adhesión entre parte sana y alterada
- Mejorar la dureza y resistencia mecánica
- Mejorar la durabilidad

### ◆ Hidrofugación

- Reducir la penetración de agua líquida y solutos
- Proteger del ambiente: humedad, polvo y organismos
- Mantener la limpieza durante más tiempo
- Frenar los procesos de alteración: mejorar la durabilidad

⇒ *condicionan los criterios de valoración*

# VALORACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

## ➤ REQUISITOS DE LOS PRODUCTOS

- Ser fáciles de aplicar: no ser peligrosos
- Mantener el aspecto de los materiales
  - no formar costras o películas superficiales
  - minimizar los cambios de color o brillo de piedra
- Minimizar los cambios de la permeabilidad al vapor de agua
- No generar productos nocivos
- Tener estabilidad química frente al ambiente
- Ser reversible: de fácil extracción

# VALORACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

## ➤ CONCEPTOS A VALORAR

- **EFICACIA:** poder de actuación a corto plazo
- **DURABILIDAD:** resistencia a alterarse a más largo plazo
- **NOCIVIDAD:** desarrollo de efectos indeseables
- **RENDIMIENTO:** proporción entre el resultado obtenido y los medios utilizados
- **IDONEIDAD:** adecuación para el fin propuesto

## ➤ VALORACION RELATIVA: COMPARATIVA

A) Entre muestras sin tratar y tratadas

B) Entre muestras con distintos tratamientos:

- distintos productos
- distintos métodos

► Fort R (2006). *Tratamientos de conservación y restauración de geomateriales: Tratamientos de consolidación e hirofugación*.  
En: La conservación de los geomateriales utilizados en el patrimonio. Universidad Complutense de Madrid - CSIC, 125-132 *en la red*



# VALORACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

→ *valorar un material nuevo = tratamiento + sustrato*

## ➤ FACTORES IMPLICADOS

→ **Relacionados con el material** (*sustrato del tratamiento*)

→ **Relacionados con el ambiente de exposición**

→ **Relacionados con el tratamiento:**

### ▪ **Producto aplicado**

- **tipo:** adhesivo, consolidante, hidrofugante
- **composición:** fórmula química, producto activo
- **preparación:** concentración, disolvente

### ▪ **Procedimiento de aplicación**

- **estado del material:** consistencia, humedad
- **modo de aplicar:** brocha, spray, capilar, compresas
- **condiciones de curado:** T, Hr, tiempo

# VALORACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

## ➤ ETAPA DE EVALUACIÓN:

### ▪ **DIAGNÓSTICO:**

→ **Ensayos previos: en laboratorio, “in situ”**

⇒ Verificación de los productos

⇒ Selección de productos y métodos

### ▪ **MANTENIMIENTO:**

⇒ Evolución de tratamientos aplicados

# VALORACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

## ➤ METODOLOGÍA

### ❖ VALORACIÓN TEÓRICA

- Estudios previos

► M. L. TABASSO & S. SIMON (2006). *Métodos de ensayo y criterios para la selección y evaluación de productos para la conservación de materiales de construcción porosos*. REVIEWS IN CONSERVATION 7, 67-82

### ❖ VALORACIÓN EXPERIMENTAL

- Ensayos de laboratorio

- Producto absorbido
- Propiedades físicas
- Ensayos de durabilidad

- Ensayos “in situ”

- Propiedades físicas



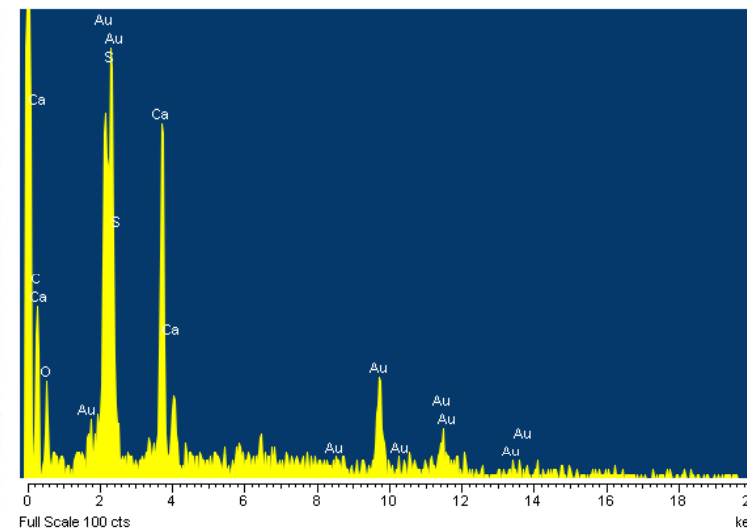
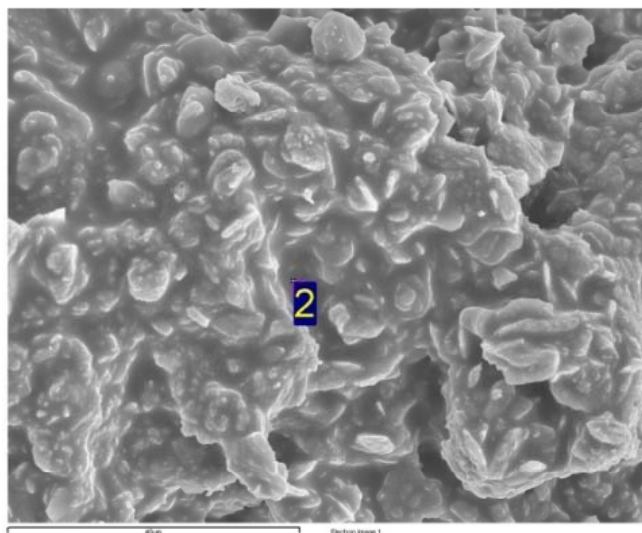
# VALORACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

## ➤ ENSAYOS DE LABORATORIO

### ■ Producto absorbido

- Ganancia de peso de la muestra:  $Q_p = (M_2 - M_1 / M_1) \cdot 100$
- Aspecto: microfisuración y rugosidad
- Distribución del producto en superficie
- Distribución en profundidad: penetración

→ **Microscopía + análisis químico: SEM + EDX**



# VALORACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

## ➤ ENSAYOS DE LABORATORIO

### ■ Propiedades físicas

- Color y brillo
- Porosidad y porimetría
- Absorción de agua y de vapor de agua
  - absorción por capilaridad
  - absorción por inmersión total
  - absorción a baja presión
  - absorción de gotas de agua
- Desorción de agua: Propiedades de secado
- Permeabilidad al vapor de agua
- Ángulo de contacto
- Dureza y resistencia mecánica
- Propiedades dinámicas

## ENSAYOS DE LABORATORIO

| PROPIEDAD                               | CONSO-<br>LIDANTE | HIDRO-<br>FUGANTE | CRITERIO                 |
|-----------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------|
| Color                                   | X                 | X                 | Ninguno o mínimo cambio  |
| Porosidad abierta                       | X                 | X                 | Disminución              |
| Distribución de tamaño de poro          | X                 |                   | Disminuir poros pequeños |
| Contenido en agua 48 horas              | X                 | X                 | Disminución              |
| Coefficiente de absorción capilar       | X                 | X                 | Disminución              |
| Coefficiente de penetración capilar     | X                 | X                 | Disminución              |
| Altura máxima de agua capilar           | X                 | X                 | Disminución              |
| Profundidad de penetración del producto | X                 | X                 | Aumentar                 |
| Dilatación hídrica (por agua)           | X                 | X                 | No aumentar              |
| Dilatación higríca (por vapor de agua)  | X                 | X                 | No aumentar              |
| Dilatación térmica                      | X                 | X                 | No aumentar              |
| Permeabilidad al vapor de agua          | X                 | X                 | Pequeña disminución      |
| Evaporación: Duración del secado        | X                 | X                 | No aumentar              |
| Evaporación: Índice de secado           | X                 | X                 | No aumentar              |
| Ángulo de contacto                      |                   | X                 | Ángulo mayor de 90°      |
| Tiempo de absorción de microgotas       |                   | X                 | Disminución              |

## ENSAYOS DE LABORATORIO

| PROPIEDAD                             | CONSO-<br>LIDANTE | HIDRO-<br>FUGANTE | CRITERIO               |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------|------------------------|
| Resistencia a la compresión           | X                 |                   | Ligero aumento         |
| Resistencia a la tracción (brasileño) | X                 |                   | Ligero aumento         |
| Resistencia a la flexión              | X                 |                   | Ligero aumento         |
| Módulo de elasticidad estático        | X                 |                   | Ligero aumento         |
| Velocidad de propagación de ondas     | X                 |                   | Aumento homogéneo      |
| Módulo de elasticidad dinámico        | X                 |                   | Ligero aumento         |
| Resistencia a la perforación          | X                 |                   | Perfil homogéneo       |
| Resistencia a la abrasión             | X                 |                   | Ligero aumento         |
| Dureza de la superficie               | X                 |                   | Ligero aumento         |
| Propiedades microscópicas             | X                 | X                 | Distribución homogénea |

► Tabasso M.L. & Simon S. (2006). *Métodos de ensayo y criterios para la selección y evaluación de productos para la conservación de materiales de construcción porosos*. Reviews in Conservation 7, 67-82.

# VALORACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

## NORMAS EUROPEAS: CONSERVACIÓN DEL PATRIMONIO CULTURAL (CEN/TC 346)

► **EN 16581:2014. Evaluación de métodos y productos de conservación. Protección de la superficie de materiales inorgánicos porosos. Métodos de ensayo de laboratorio para la evaluación del comportamiento de productos hidrofugantes.**

- No modificar el valor del patrimonio cultural: Respetar los códigos éticos
- Para materiales inorgánicos porosos: piedras naturales y materiales artificiales (mortero, ladrillo...)
  - Procedimiento de ensayo:
    - Preparación de muestras
    - Medida de los parámetros en muestras sin tratar
    - Determinar tiempo y método de tratamiento
    - Medida de los parámetros en muestras tratadas
    - Alteración artificial: ensayos de envejecimiento
    - Medida de parámetros en muestras envejecidas
    - Evaluación
  - Preparación de muestras:
    - Planas, acabadas, limpias con agua corriente y destilada
    - Número de muestras  $\geq 3 / 5$  (color).
    - Tamaño: LxLxL / 4x4x8 / 5x5x2 / 5x5x1; DxR / 4x8 / 4,5x0,5 cm
    - Temperatura de secado: 60 / 40 °C.
    - Condiciones ambiente: 20 °C, 50 % HR (medidas: color, permeabilidad...)

**EN 16581:2014. Evaluación de métodos y productos de conservación. Protección de la superficie de materiales inorgánicos porosos. Métodos de ensayo de laboratorio para la evaluación del comportamiento de productos hidrofugantes.**

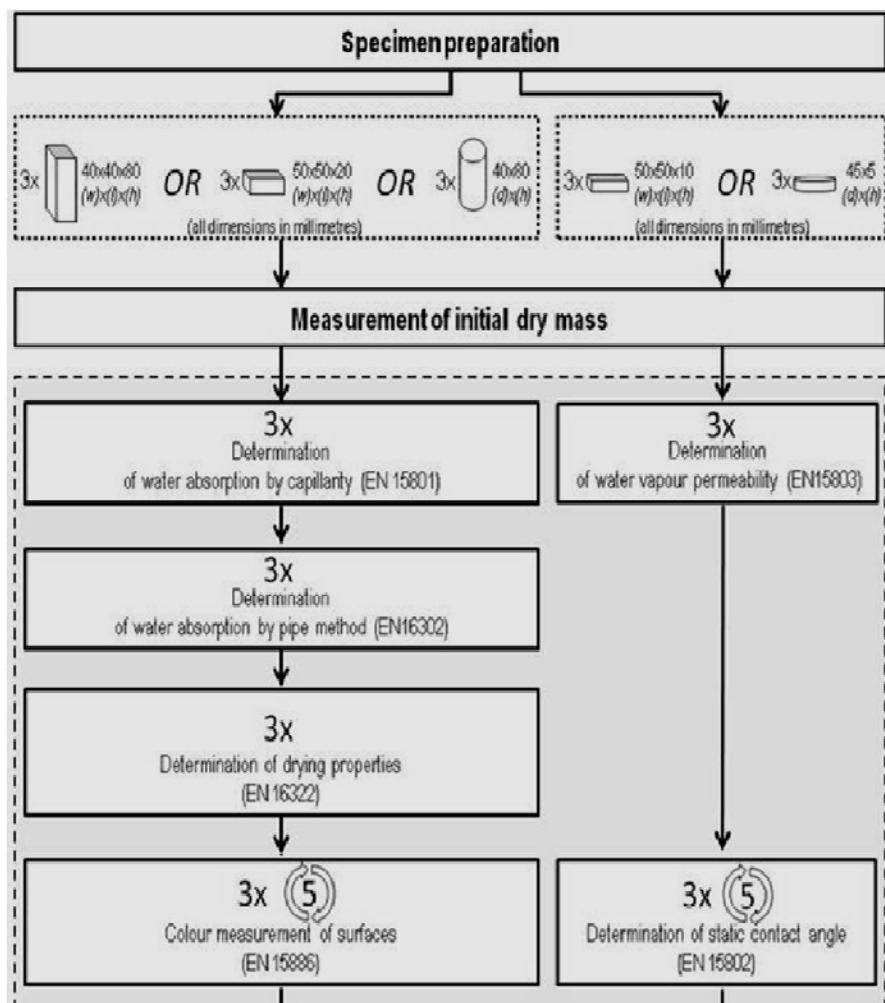
## **MÉTODOS DE ENSAYO PARA LA EVALUACIÓN**

- Determinación de la absorción de agua por **capilaridad** (UNE-EN 15801:2010)
- Determinación del **ángulo de contacto** estático (UNE-EN 15802:2010)
- Determinación de la **permeabilidad al vapor** de agua (UNE-EN 15803:2010)
- Medición del **color** de superficies (UNE-EN 15886:2011)
- Determinación de la **absorción de agua por el método de la pipeta** (EN 16302:2012)
- Determinación de las propiedades de **secado** (EN 16322:2013)
- Determinación del **brillo** de superficies (EN ISO 2813)
- [Determinación de la absorción de agua por inmersión total (Nº 65:2008)]

## **EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A LARGO PLAZO**

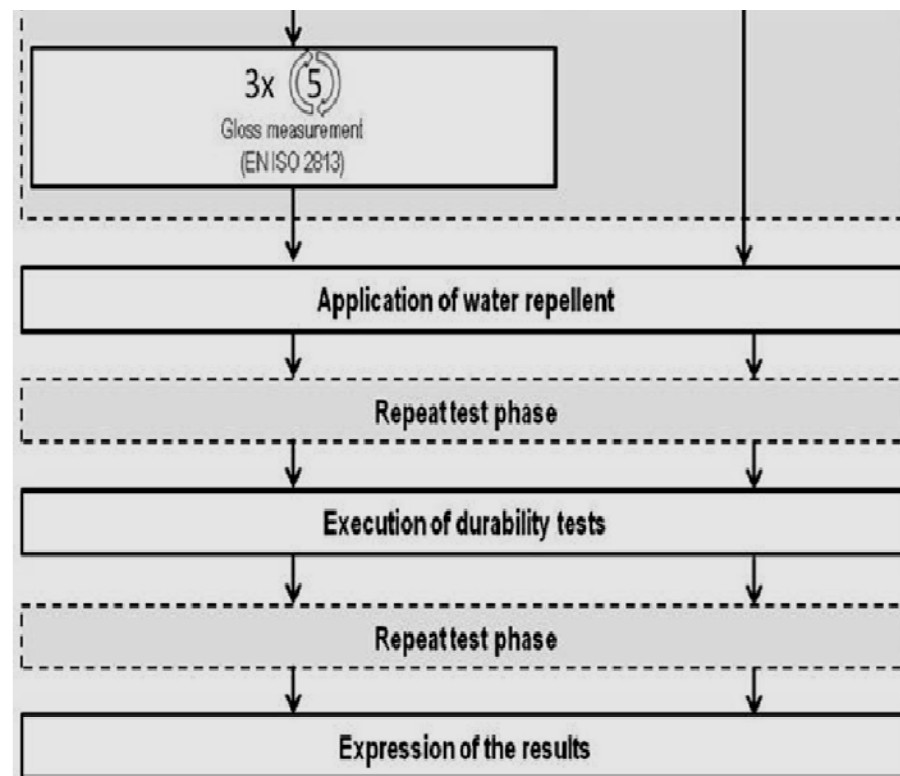
- Ensayos de durabilidad

**EN 16581:2014. Evaluación de métodos y productos de conservación. Protección de la superficie de materiales inorgánicos porosos. Métodos de ensayo de laboratorio para la evaluación del comportamiento de productos hidrofugantes.**



**PROCEDIMIENTO DE ENSAYO**

**Etapas de evaluación**



**EN 16581:2014. Evaluación de métodos y productos de conservación. Protección de la superficie de materiales inorgánicos porosos. Métodos de ensayo de laboratorio para la evaluación del comportamiento de productos hidrofugantes.**

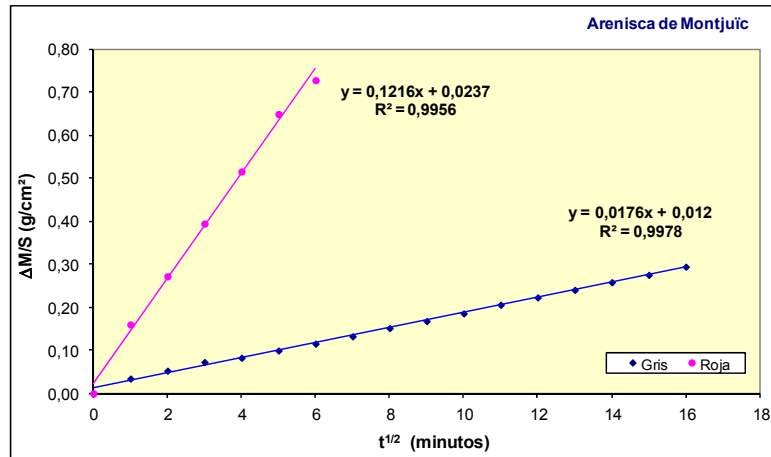
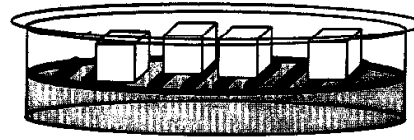
**PROCEDIMIENTO DE ENSAYO: Preparación de muestras, número y dimensiones**

| TEST METHOD                                                                                                       | CHARACTERISTICS OF TEST SPECIMENS                              |                                                                                                                                                                                      |                                                     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
|                                                                                                                   | Test specimens (number of measurements for each test specimen) | SHAPE                                                                                                                                                                                | DIMENSIONS mm                                       |
| Determination of water absorption by capillarity                                                                  | 3                                                              | <br>OR<br>     | 50 x 50 x 20<br>OR<br>40 x 40 x 80<br>OR<br>40 x 80 |
| Determination of static contact angle                                                                             | 3 (5 measurements on each test specimen)                       | flat surface                                                                                                                                                                         | -                                                   |
| Determination of water vapour permeability                                                                        | 3                                                              |                                                                                                   | 50 x 50 x 10                                        |
|                                                                                                                   |                                                                |                                                                                                   | 45 x 5                                              |
| Colour measurement of surfaces                                                                                    | 3 (5 measurements on each test specimen)                       | flat surface                                                                                                                                                                         | -                                                   |
| Determination of water absorption by pipe method<br>NOTE: supplied dimensions relate to the use of vertical pipe. | 3                                                              | <br>OR<br>  | 50 x 50 x 20<br>OR<br>40 x 40 x 80<br>OR<br>40 x 80 |
| Determination of drying properties                                                                                | 3                                                              | <br>OR<br> | 50 x 50 x 20<br>OR<br>40 x 40 x 80<br>OR<br>40 x 80 |
| Gloss measurement                                                                                                 | 3 (5 measurements on each test specimen)                       | flat surface                                                                                                                                                                         | -                                                   |



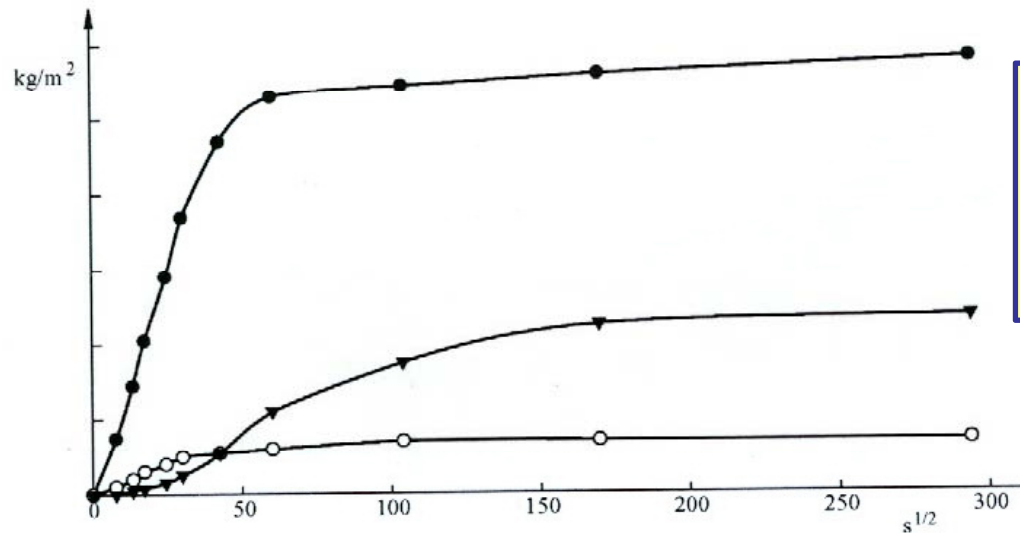
# **ABSORCIÓN DE AGUA POR CAPILARIDAD** (UNE-EN 15801:2011)

T= 21°C Hr= 75%



## **Resultados:**

- **Coeficiente absorción capilar**  
 $AC = \Delta m / (A \cdot \Delta t^{1/2})$  [kg/(m<sup>2</sup>·s<sup>1/2</sup>)]
- **Coeficiente penetración capilar**  
 $B = H / \Delta t^{1/2}$  [cm/s<sup>1/2</sup>]
- **Cantidad de agua absorbida en el tiempo t<sub>i</sub>**  
 (i = 1, 4, 8, 24 horas)  
 $Q_i$  [kg]



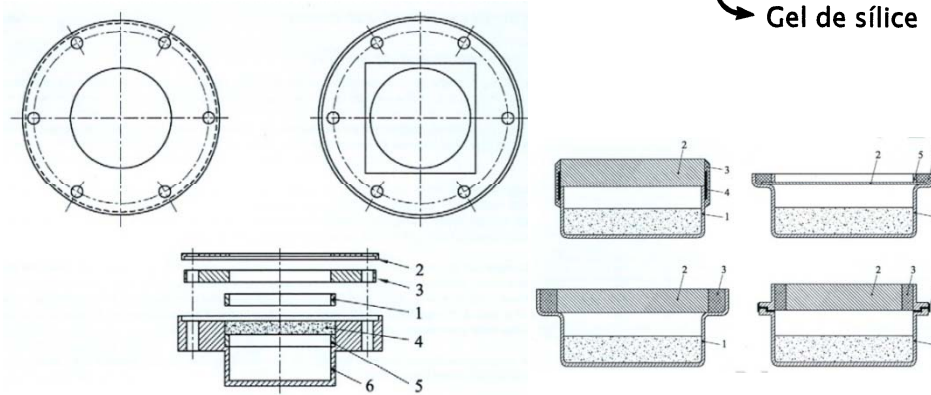
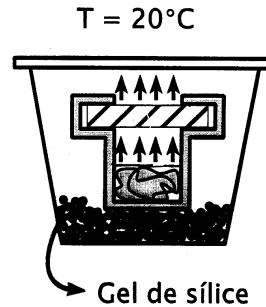
## **Grado de protección:**

- $GP_{Ci} = ((Q_{iB} - Q_{iA}) / Q_{iB}) \cdot 100$  [%]
- B = antes del tratamiento
- A = después del tratamiento

### **Leyenda**

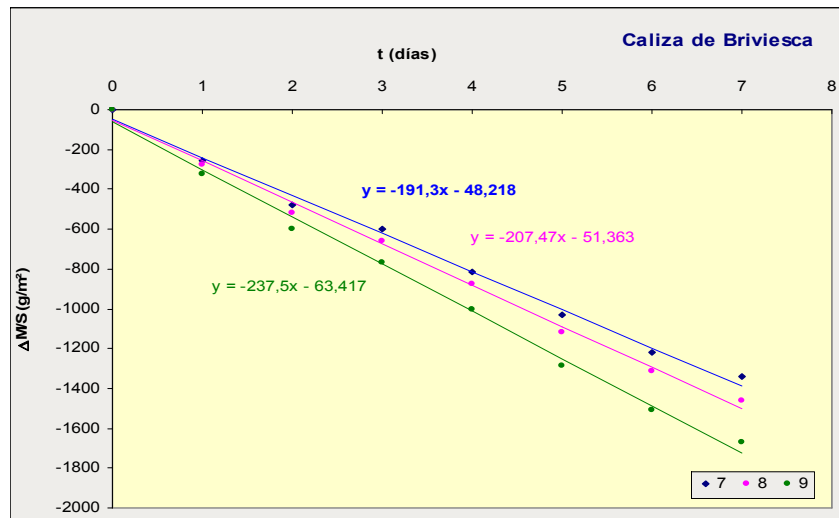
- No tratada
- Con tratamiento A
- ▼ Con tratamiento B

## PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA (UNE-EN 15803:2011)



### Resultados:

- Densidad de caudal de vapor de agua:  
 $g = \Delta m / (S \cdot \Delta t)$   $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})]$
- Penetración del vapor de agua:  
 $W_p = g / \Delta p_v$   $[\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$
- Permeabilidad al vapor de agua:  
 $\delta_p = W_p \cdot D$   $[\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$

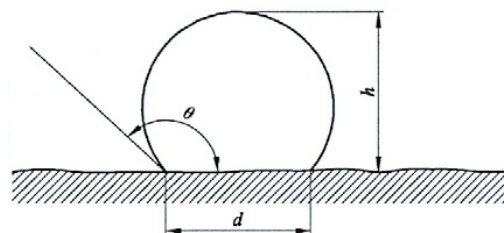
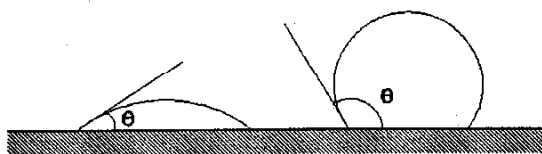


### Grado de protección:

- $GP_{\delta} = ((\delta_{pB} - \delta_{pA}) / \delta_{pB}) \cdot 100$  [%]
- B = antes del tratamiento
- A = después del tratamiento

# ÁNGULO DE CONTACTO

(UNE-EN 15802:2011)

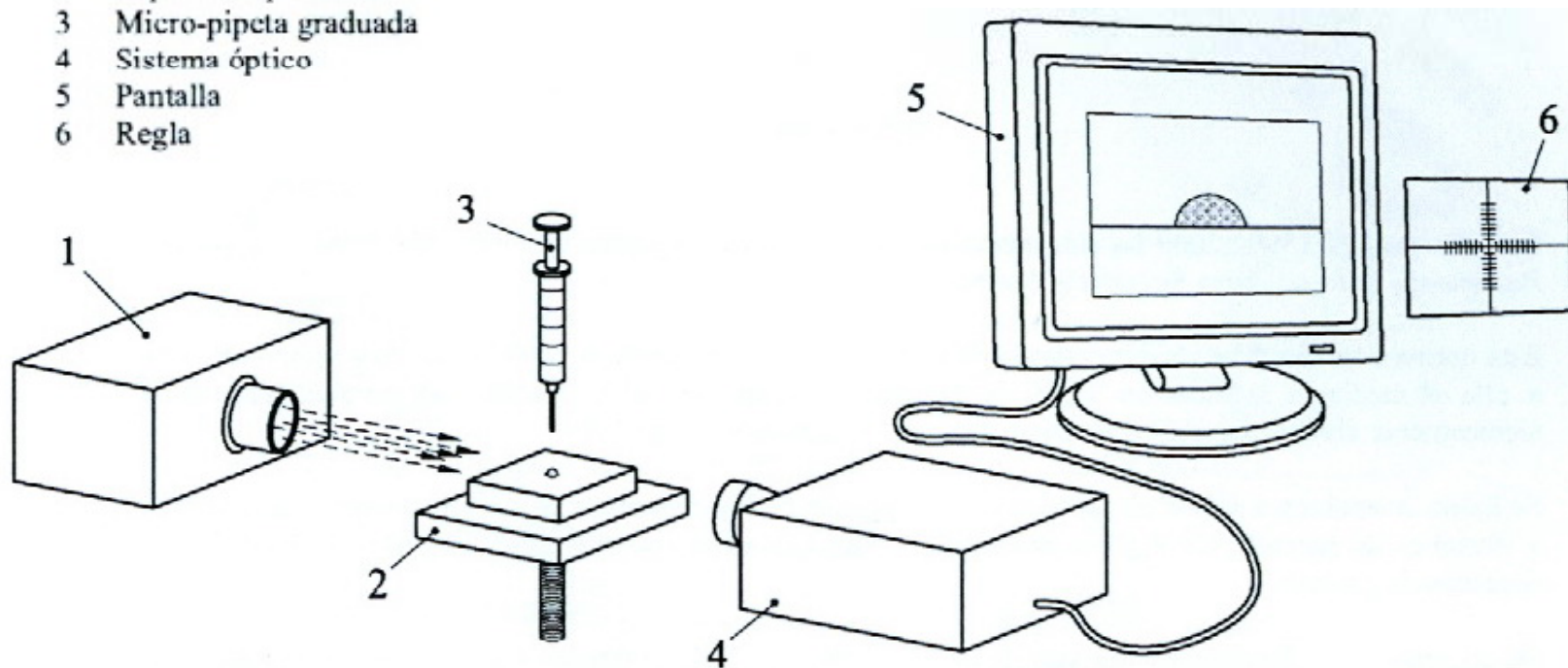


## Resultado:

► Ángulo de contacto:  
 $\theta = 2 \arctg (2 h / d)$

## Leyenda

- 1 Fuente de iluminación
- 2 Soporte de probeta
- 3 Micro-pipeta graduada
- 4 Sistema óptico
- 5 Pantalla
- 6 Regla



## MEDICIÓN DEL COLOR

(UNE-EN 15886:2011)



### Resultados:

► Valores de color CIELAB:

$L^* a^* b^*$  1976,

- iluminante: D65 (luz diurna)

- observador:  $10^\circ$

► Diferencia total de color:

$$\Delta E_{B,A}^* = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$$

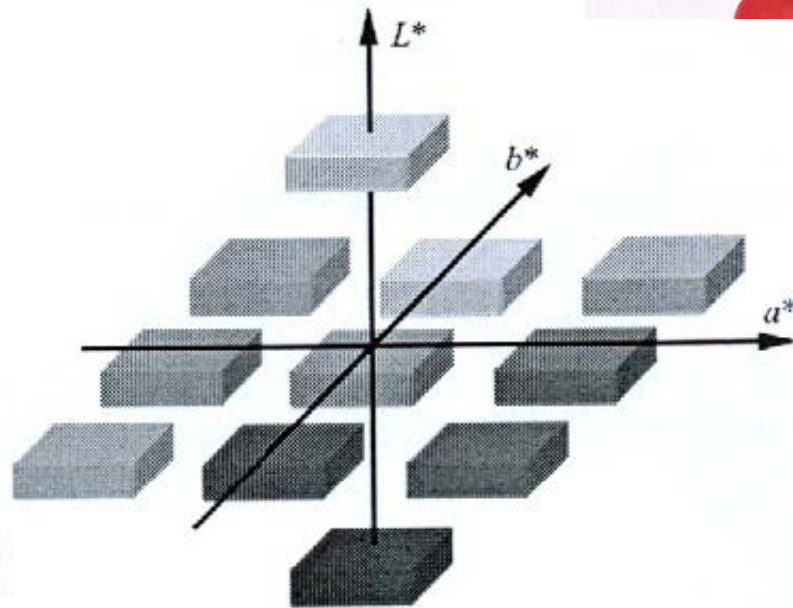
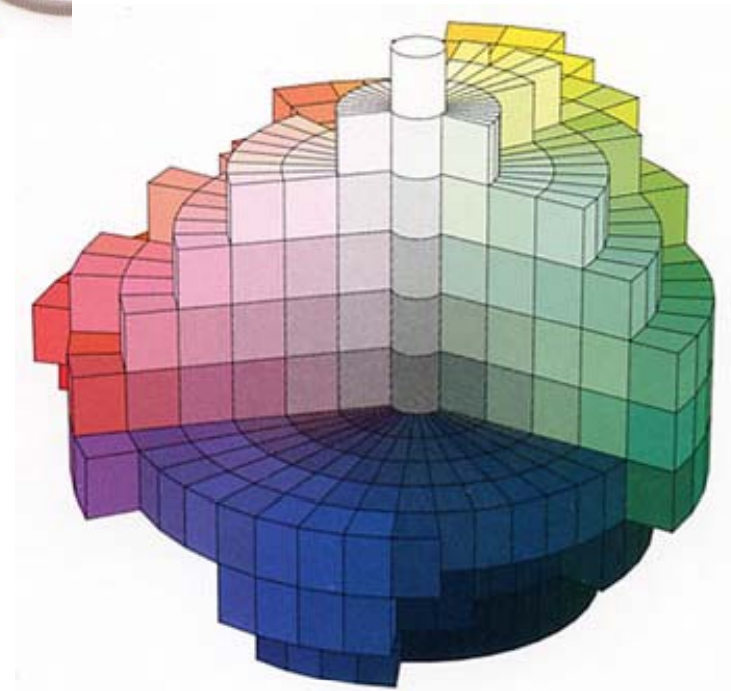


Figura 1 – Espacio cromático  $L^*a^*b^*$



# **ABSORCIÓN DE AGUA POR EL MÉTODO DE LA PIPA**

(EN 16302:2011)

permeabilidad al agua

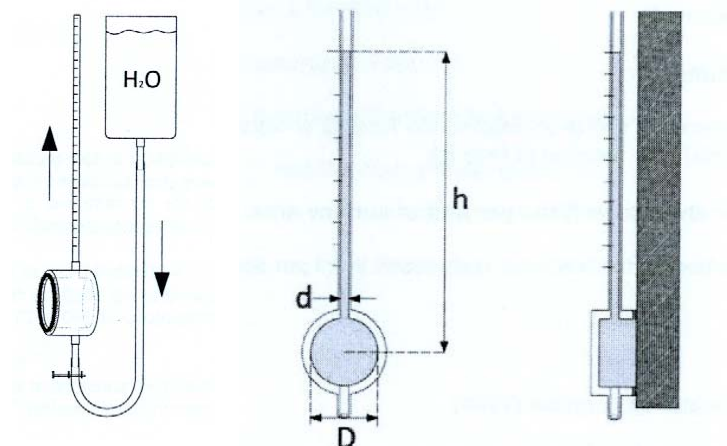


Figure 1: Scheme of pipe type for vertical surface

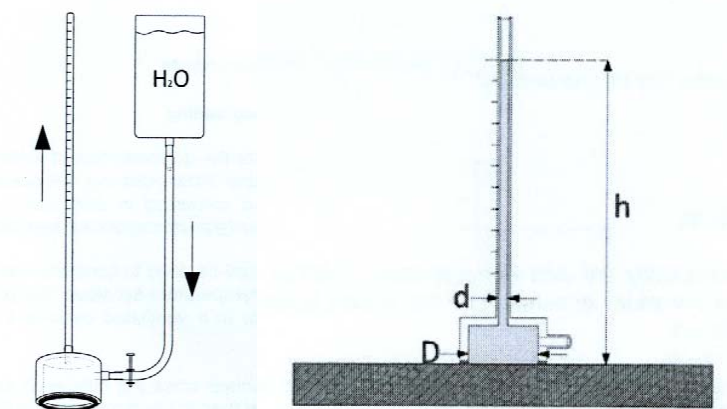


Figure 2: Scheme of pipe type for horizontal surface

## **Resultados:**

### ► **Absorción de agua:**

por unidad de superficie, para un tiempo  $i$   
- tiempo considerado: 30 min – 5 min

$$W_i = (Q_i / S) \quad [\text{ml/cm}^2]$$

### ► **Absorción de agua total:**

por unidad de superf., para tiempo final = cte

$$W_f = (Q_f / S) \quad [\text{ml/cm}^2]$$

## **Grado de protección:**

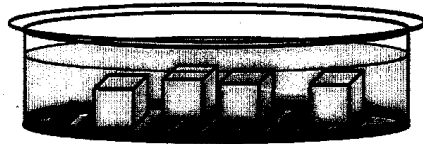
$$\text{GP}_w = (W_{fB} - W_{fA} / W_{fB}) \cdot 100 \quad [\%]$$

B = antes del tratamiento

A = después del tratamiento

## PROPIEDADES DE SECADO

(EN 16322:2011)



### Resultados:

- ▶ Agua retenida (para un tiempo i):  

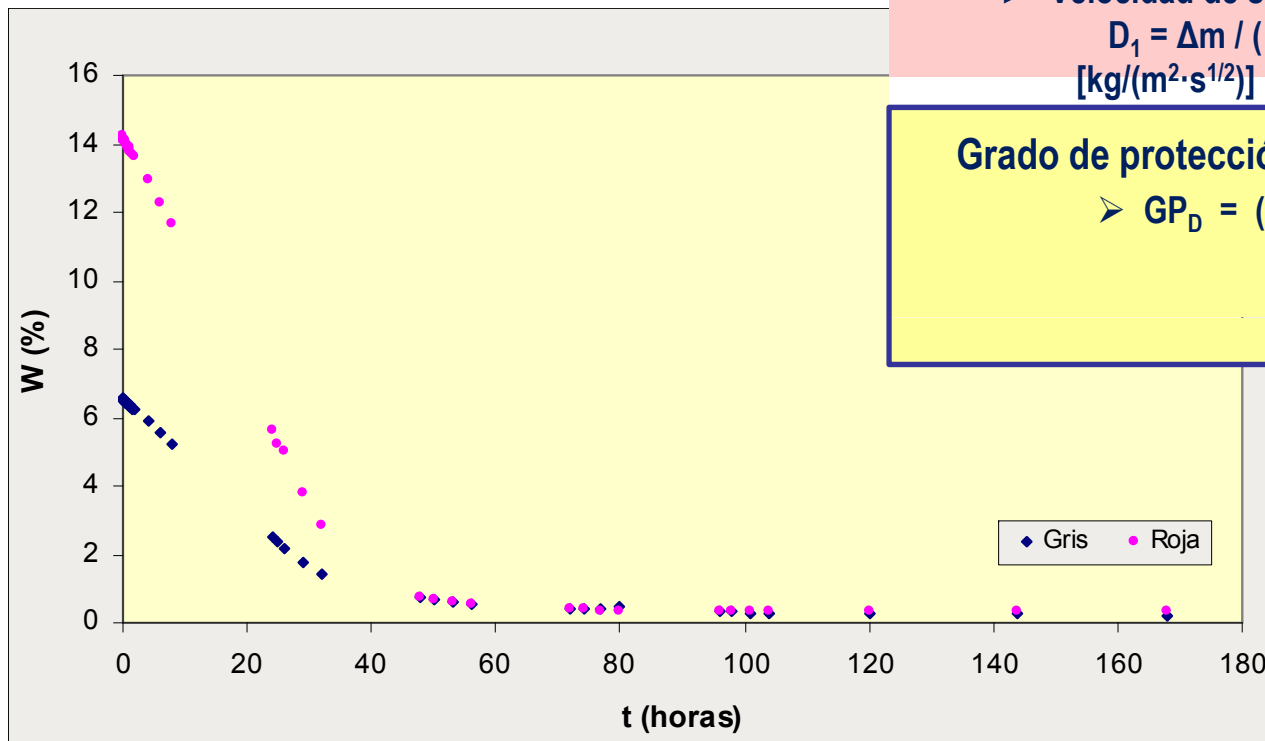
$$M_i = ((m_i - m_f) / A) \cdot 100 \quad [\text{kg/m}^2]$$
- ▶ Curva de secado:  $W_i \rightarrow$  tiempo
- ▶ Índice de secado ( $\leq 8$  días):  

$$IA = \text{integral} (M_i dt / M_{\max} \cdot t_f)$$
- ▶ Velocidad de secado (en 1ª fase):  

$$D_1 = \Delta m / (A \cdot \Delta t^{1/2}) \quad [\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})]$$

### Grado de protección:

- $GP_D = ((D_{1B} - Q_{1A}) / Q_{1B}) \cdot 100 \quad [\%]$   
 B = antes del tratamiento  
 A = después del tratamiento





## ABSORCION DE AGUA POR INMERSIÓN TOTAL (N.65:2008)

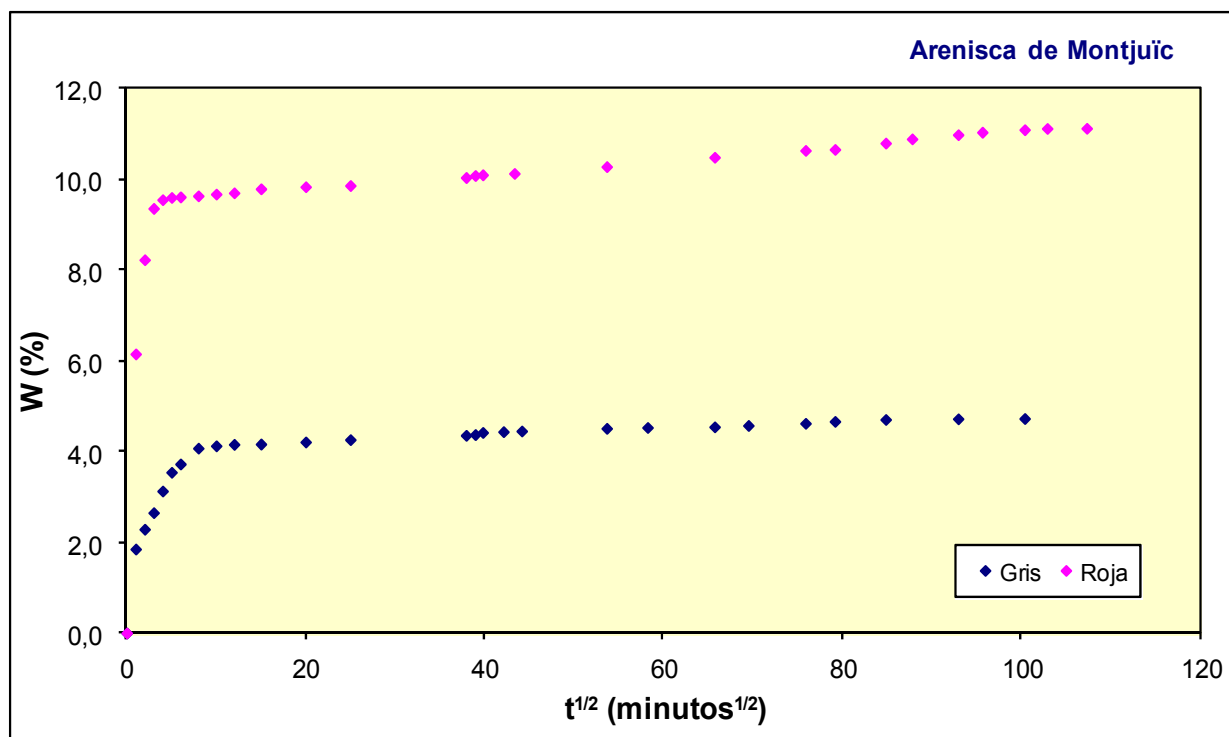


### Resultados:

- ▶ Agua absorbida (para un tiempo  $i$ ):  

$$W_i = ((m_i - m_{\text{sec}}) / m_{\text{sec}}) \cdot 100 \quad [\%]$$
- ▶ Curva de absorción:  $W_i \rightarrow$  tiempo
- ▶ Capacidad de imbibición ( $\leq 8$  días):  

$$IC = ((m_{\text{max}} - m_{\text{sec}}) / m_{\text{sec}}) \cdot 100 \quad [\%]$$

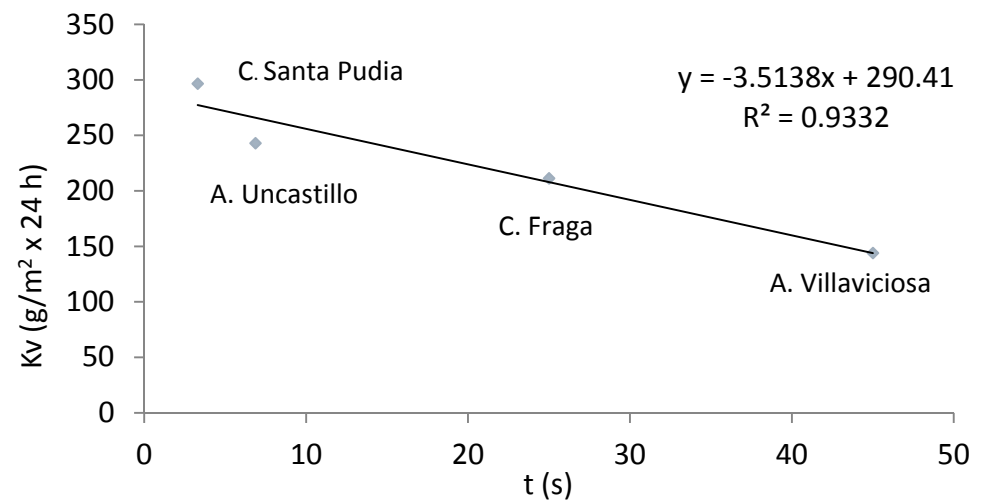


## ABSORCION DE GOTAS DE AGUA



### Resultado:

► Tiempo que dura la absorción:  
t [s]



| CORRELACIÓN ENTRE PROPIEDADES        | ECUACIÓN              | R <sup>2</sup> |
|--------------------------------------|-----------------------|----------------|
| Absorción baja presión & Capilaridad | $y = 0,0048 x - 0,07$ | 0,72           |
| Absorción de gotas & Porosidad       | $y = -2,578 x + 87,7$ | 0,87           |
| Absorción de gotas & Permeabilidad   | $y = -3,514 x + 290$  | 0,93           |

► 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.



# VALORACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

## ➤ PRUEBAS DE LABORATORIO

### ▪ Ensayos de durabilidad

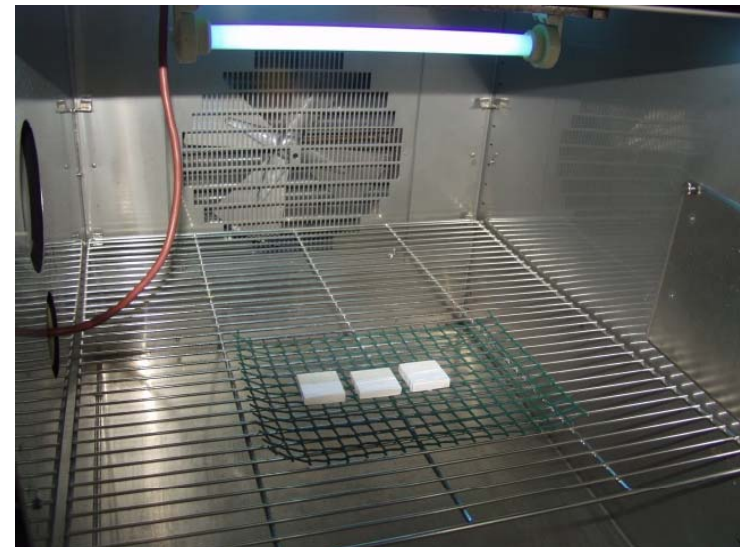
- Ciclos termohídricos: choque térmico\*
- Ciclos de heladicidad\*
- Ciclos de cristalización de sales\*
- Atmósferas salinas: ciclos de niebla salina\*
- Atmósferas ácidas: ciclos de niebla ácida\*
- Radiación ultravioleta

*\*mismos ensayos que en piedra natural*

# EXPOSICIÓN A RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

→ simular la irradiación de la luz solar en la región UV del espectro

- **Fuente de radiación constante**
  - Lámpara fluorescente de vapor de Hg de baja presión
- **Ambiente controlado**
  - Temperatura 25°C, humedad relativa 75 %
- **Procedimiento**
  - Distancia de la fuente de radiación 40 cm
  - Radiación continua
- **Duración ensayo**
  - 10 días



# EXPOSICIÓN A RADIACIÓN ULTRAVIOLETA

## UNE-EN ISO 4892-3 (lámpara tipo 2)

- **Muestras a ensayar**
  - 5 probetas
- **Procedimiento (ciclos UV - humedad)**
  - Exposición ultravioleta: 5 horas, a  $50 \pm 3$  °C
  - Agua pulverizada: 1 hora, a  $20 \pm 3$  °C
- **Duración ensayo**
  - 180 ciclos (45 días)
- **Evaluación del ensayo**
  - Determinar absorción de agua a 15, 90 y 180 ciclos
  - Determinar permeabilidad al vapor de agua a 15, 90 y 180 ciclos

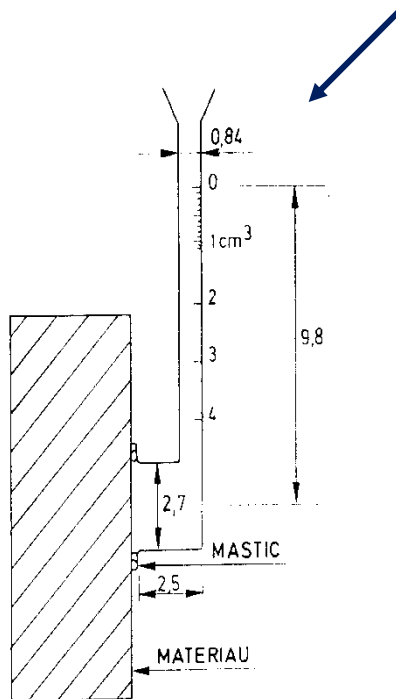
► Belgian Building Research Institute (CUAP)



# VALORACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

## ➤ PRUEBAS “IN SITU”

- color (colorímetro)
- aspecto de la superficie: distribución, fisuración
- contenido en humedad (humidímetro)
- absorción de agua (pipa)
- hidrorrepelencia (gotas)
- velocidad de propagación de ondas
- dureza (shore, schmidt)
- sales solubles (apósitos)



# VALORACIÓN DE TRATAMIENTOS DE CONSERVACIÓN

## CONSIDERACIONES FINALES

- El éxito depende de muchos factores: material a tratar, producto de tratamiento, procedimiento de aplicación, habilidad del operador...
- La aplicación de un producto y un método correcto es condición necesaria pero no suficiente.
- Analizar el comportamiento de los tratamientos en edificación tras años de exposición en ambientes reales.
- Comparar los productos de tratamiento en distintas rocas y en distintos ambientes.
- Medir parámetros no destructivos de forma sistemática: documentar condiciones del material, sitio de medida, condiciones de medida...
- Necesidad de un mantenimiento.

► Tabasso M.L. & Simon S. (2006). *Métodos de ensayo y criterios para la selección y evaluación de productos para la conservación de materiales de construcción porosos*. *Reviews in Conservation* 7, 67-82

