

Física de Edificios: Transmisión de calor y masa en cerramientos

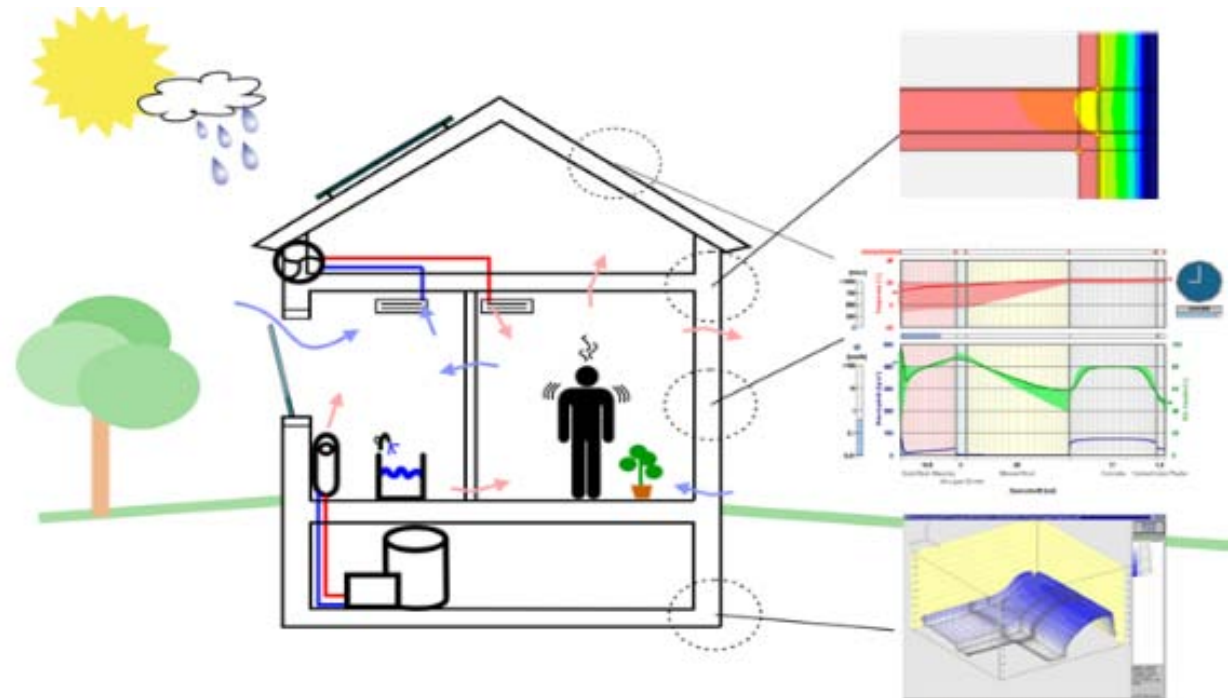


Figura: Fraunhofer Institute for Building Physics IBP
https://wufi.de/en/wp-content/uploads/sites/11/2014/04/800x321_WUFI-Plus-Schaubild.png

- Iñaki Gómez Arriaran
- Moises Odriozola Maritorea
- Koldobika Martín Escudero
- Estibaliz Pérez Iribarren
- Iker González Pino
- Naiara Romero Antón



Makina eta Motor
Termikoak Saila
Departamento de Máquinas
y Motores Térmicos

ikasTHERM
ACTIVE LEARNING IN THERMAL ENGINEERING



Tema 3 -

TRANSMISIÓN DE HUMEDAD EN CERRAMIENTOS EN RÉGIMEN PERMANENTE Y TRANSITORIO.



Transferencia de humedad en edificios

- 1ª parte: Fundamentos físicos de los mecanismos de almacenamiento y transporte de agua en medios porosos. Propiedades higroscópicas
- 2ª parte: Caracterización de las propiedades higroscópicas
- 3ª parte: Análisis higrotérmico de los cerramientos. Métodos estáticos y dinámicos. Comprobación de condensaciones.



INTRODUCCIÓN



INTRODUCCIÓN

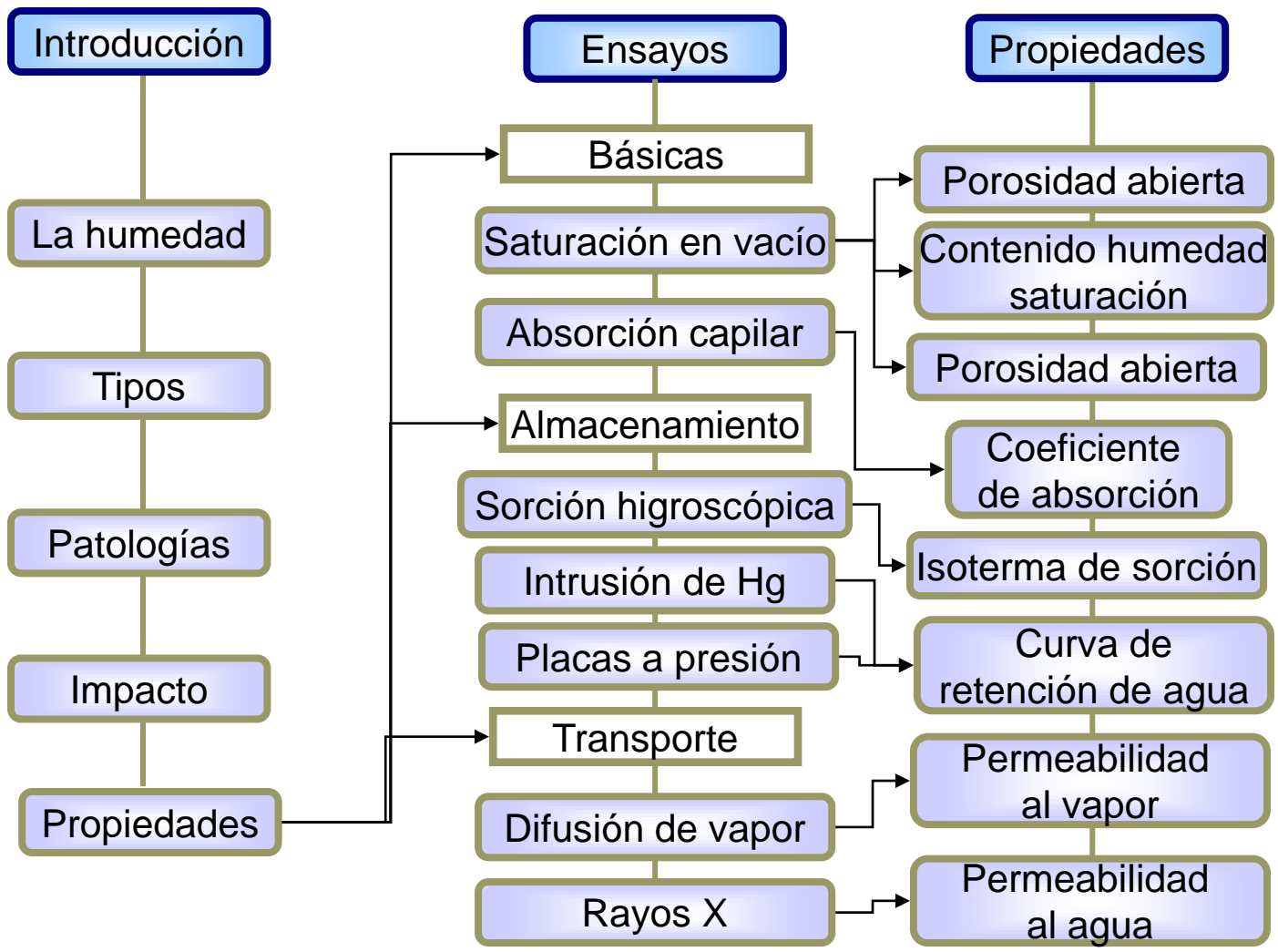
- Obetivos
- Contenido
- Naturaleza del agua
- Propiedades del agua



Objetivos

- Comprender los mecanismos de almacenamiento y transporte de humedad en medios porosos
 1. Descripción de medio poroso
 2. Almacenamiento de humedad
 3. Transporte de humedad

- Conocer las propiedades higroscópicas de los materiales de construcción porosos





- El almacenamiento y movimiento de la humedad a través de los materiales de construcción porosos, es un fenómeno complejo, multifásico, y lento, en el que tienen lugar procesos de cambio de fase, **disolución de sales, degradación de materiales y germinación de mohos.**
- La humedad tiene un **impacto** importante en diversos aspectos del comportamiento del **edificio**
- El estudio del almacenamiento y transporte de la humedad en los cerramientos, requiere:
 - **Conocimiento del fluido**
 - **Conocimiento del medio poroso**

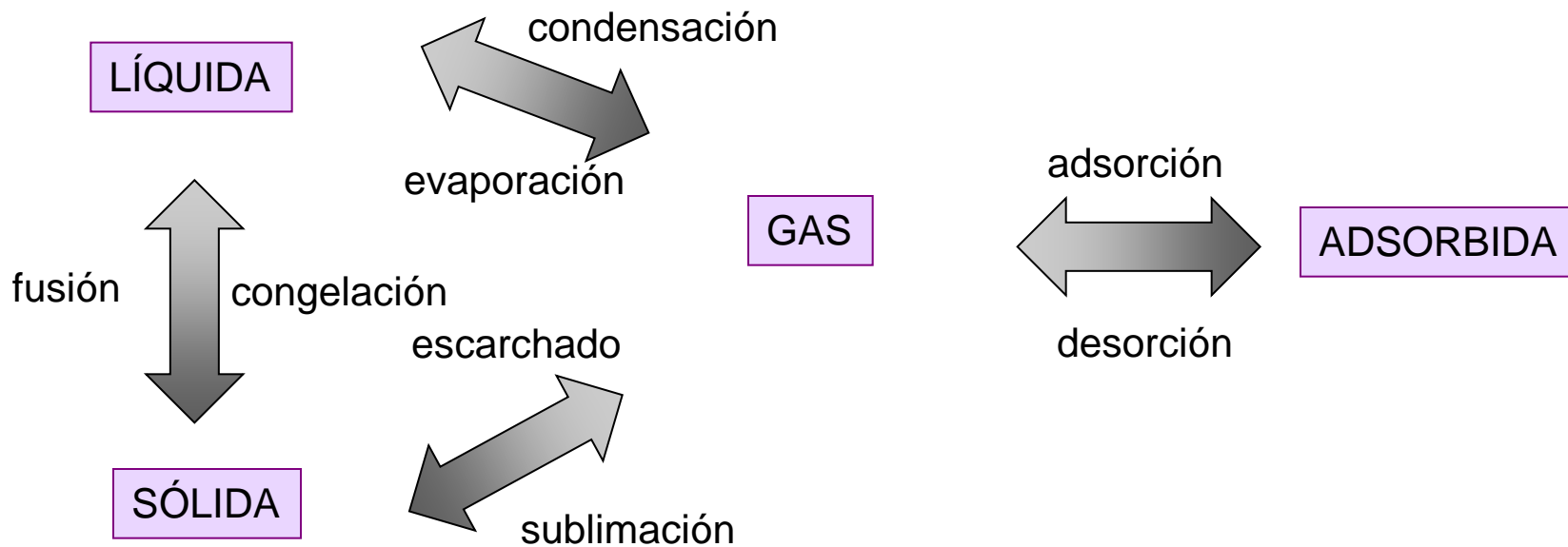


NATURALEZA DEL AGUA



Naturaleza del agua.

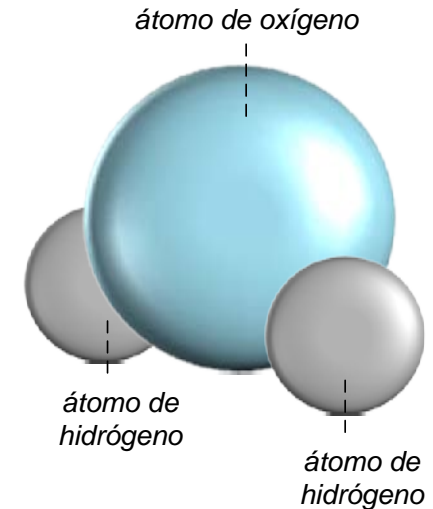
El agua puede aparecer en diferentes estados de materia en los cerramientos de un edificio, según las condiciones ambientales. Las sucesivas transformaciones de estado del agua dentro de un material poroso conllevan unas lesiones características tanto en los materiales como en los cerramientos.





Naturaleza del agua.

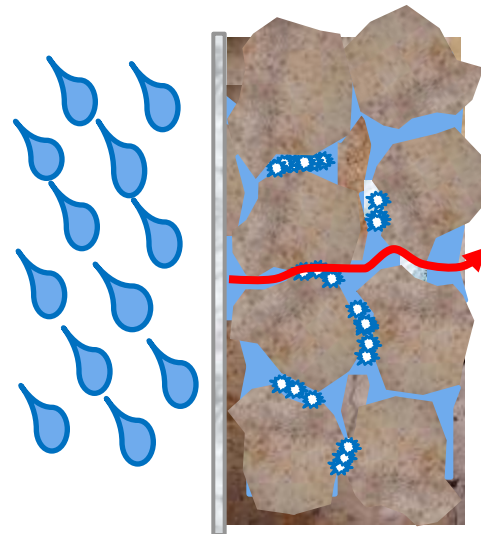
- La molécula de agua es **polar** debido al descentrado de los dos átomos de H^+ respecto al O^- , con un momento dipolar alto.
- Esta polaridad le confiere unas características especiales que tienen incidencia en su comportamiento en la edificación:
 - Posibilidad de disolver otras sustancias afines.
 - Afinidad molecular con otras sustancias
 - Tensión superficial alta (respecto a su densidad).
 - Carácter neutro ($pH = 7$) en estado puro.





Propiedades del agua y su impacto

- Cambios de estado en condiciones atmosféricas →
 - **PENETRA** fácilmente en los cerramientos a través de los poros



- procesos exotérmicos y endotérmicos en los cerramientos por el calor latente de cambio de fase



Propiedades del agua y su impacto

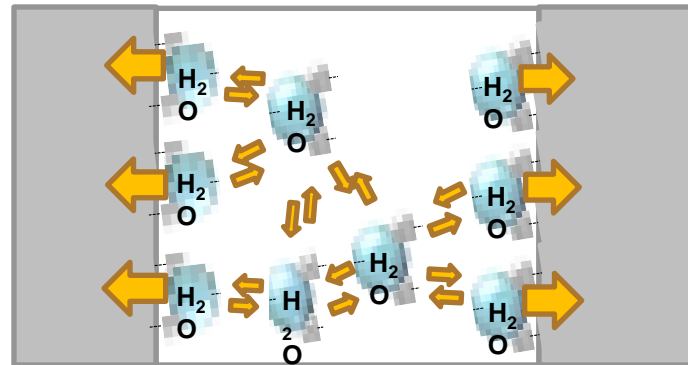
- Alta capacidad de disolución →
 - **DISUELVE y ARRASTRA** sales minerales de los materiales y del terreno (sulfatos, carbonatos, etc.)





Propiedades del agua y su impacto

- Afinidad molecular con otras sustancias →
 - **Facilita la ADSORCIÓN** de humedad desde el ambiente

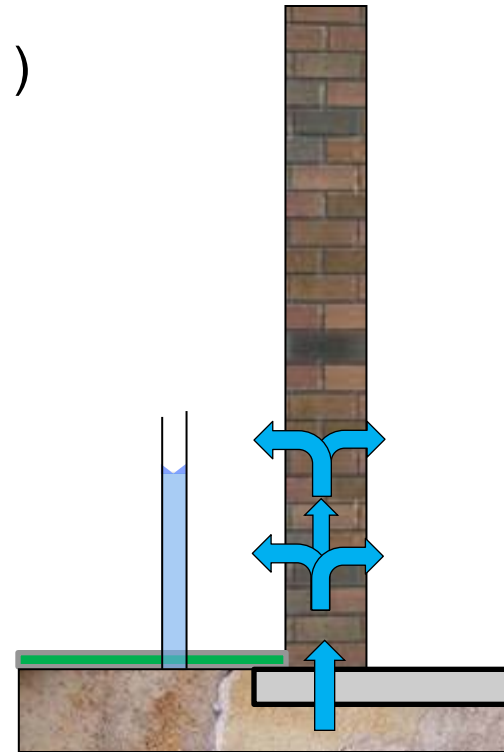
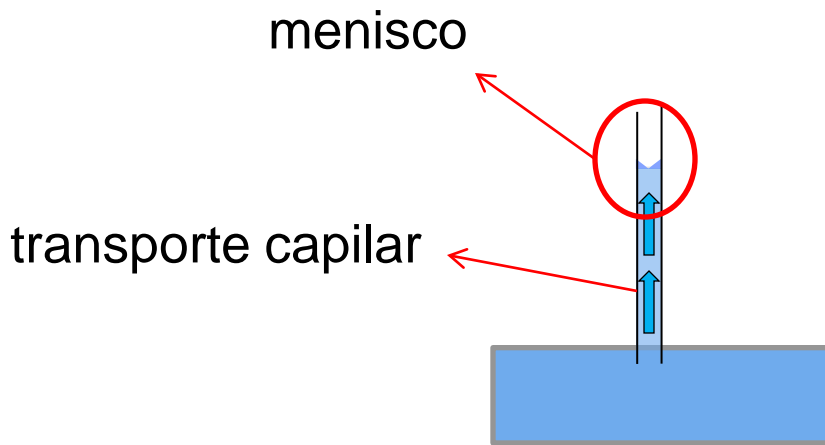




Propiedades del agua y su impacto

- Alta tensión superficial: gran poder de “mojar al sólido” → **TRANSPORTE capilar**

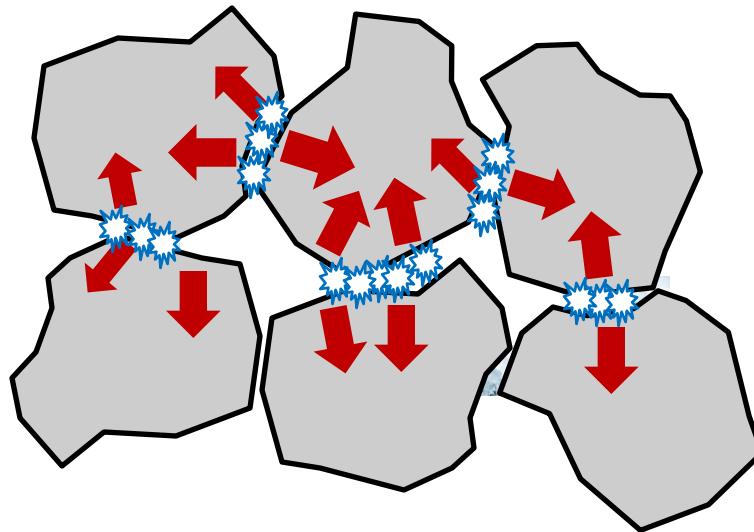
$$(\sigma_{\text{agua}} = 0'07258 \text{ N/m})$$





Propiedades del agua y su impacto

- Coeficiente de dilatación anómalo: dilata al solidificar → **FISURA y FRACTURA** al congelarse en los poros





Propiedades del agua y su impacto

- Capacidad de transportar sólidos, líquidos y gases → **capacidad de DISGREGACION y EROSION**
- Eficaz colaborador de otros agentes y reacciones químicas → **corrosión, carbonatación, etc.**



Figura: P. Moreno



FUENTES DE HUMEDAD



FUENTES DE HUMEDAD

- Equilibrio higroscópico
- Fuentes de humedad
- Psicrometría
- Fuerzas motrices
- Recorrido
- Tipos de humedad



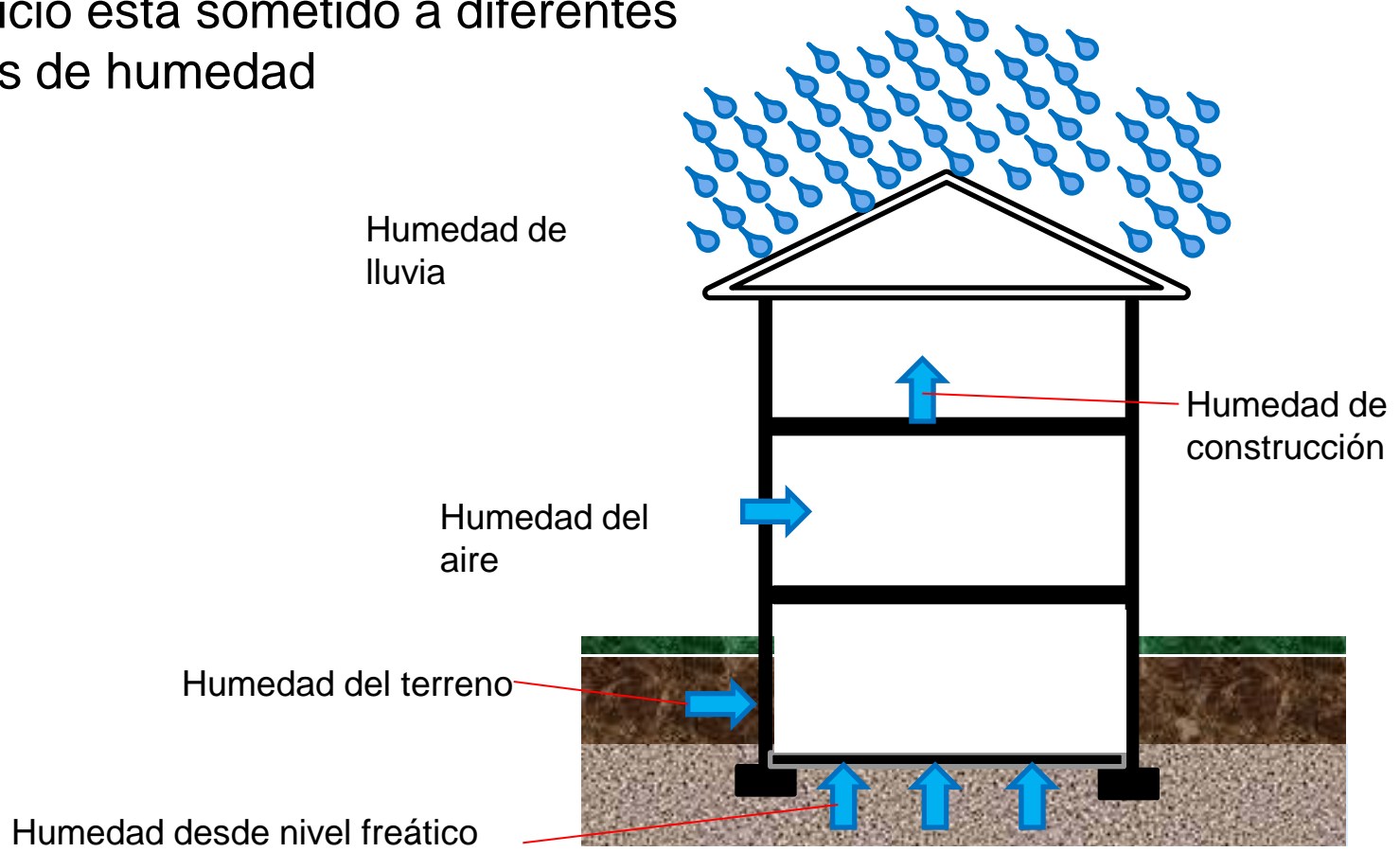
Balance higroscópico

- El flujo de humedad a través de los cerramientos requiere:
 - Una fuente
 - Un camino o recorrido
 - Una fuerza motriz
- En teoría, eliminando uno de los factores se controla el problema
- En la práctica, se controlan todos los posibles.



Las fuentes de humedad

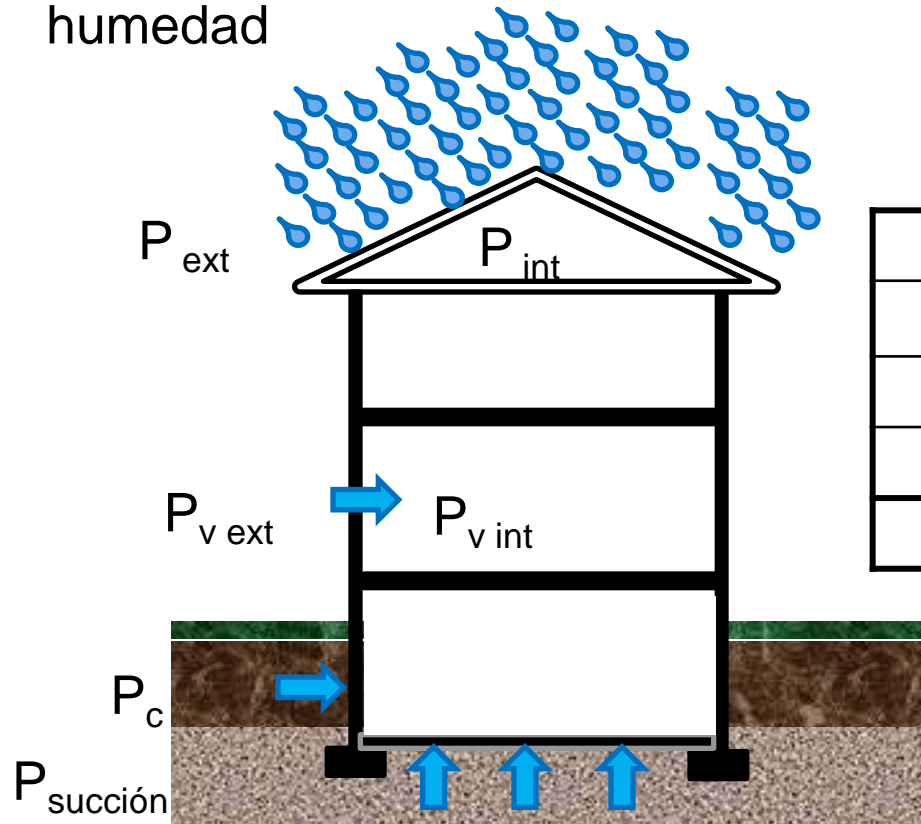
El edificio está sometido a diferentes fuentes de humedad





Las fuerzas motrices

- La fuerza motriz dependerá del mecanismo de transporte de la humedad

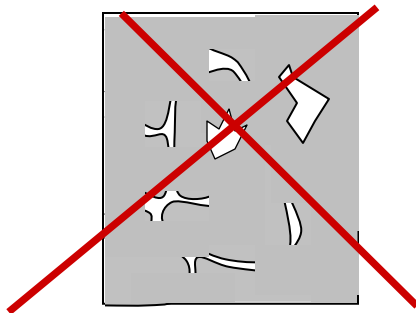


mecanismo	fuerza motriz
capilaridad	presión capilar
lluvia+viento	presión succión
difusión vapor	presión de vapor
convección	presión del aire

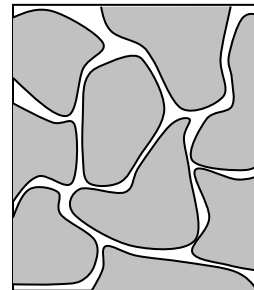


El recorrido

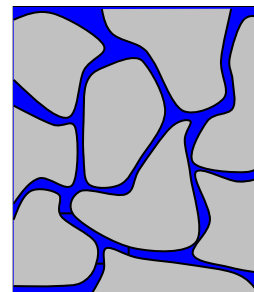
- El camino que debe recorrer la humedad es el propio material de construcción que forma el cerramiento, a través de sus poros abiertos
- Es necesario conocer y caracterizar la estructura porosa de los materiales de construcción



Estructura de poro cerrado



Estructura de poro abierto
(seco)



Estructura de poro abierto
(saturado)

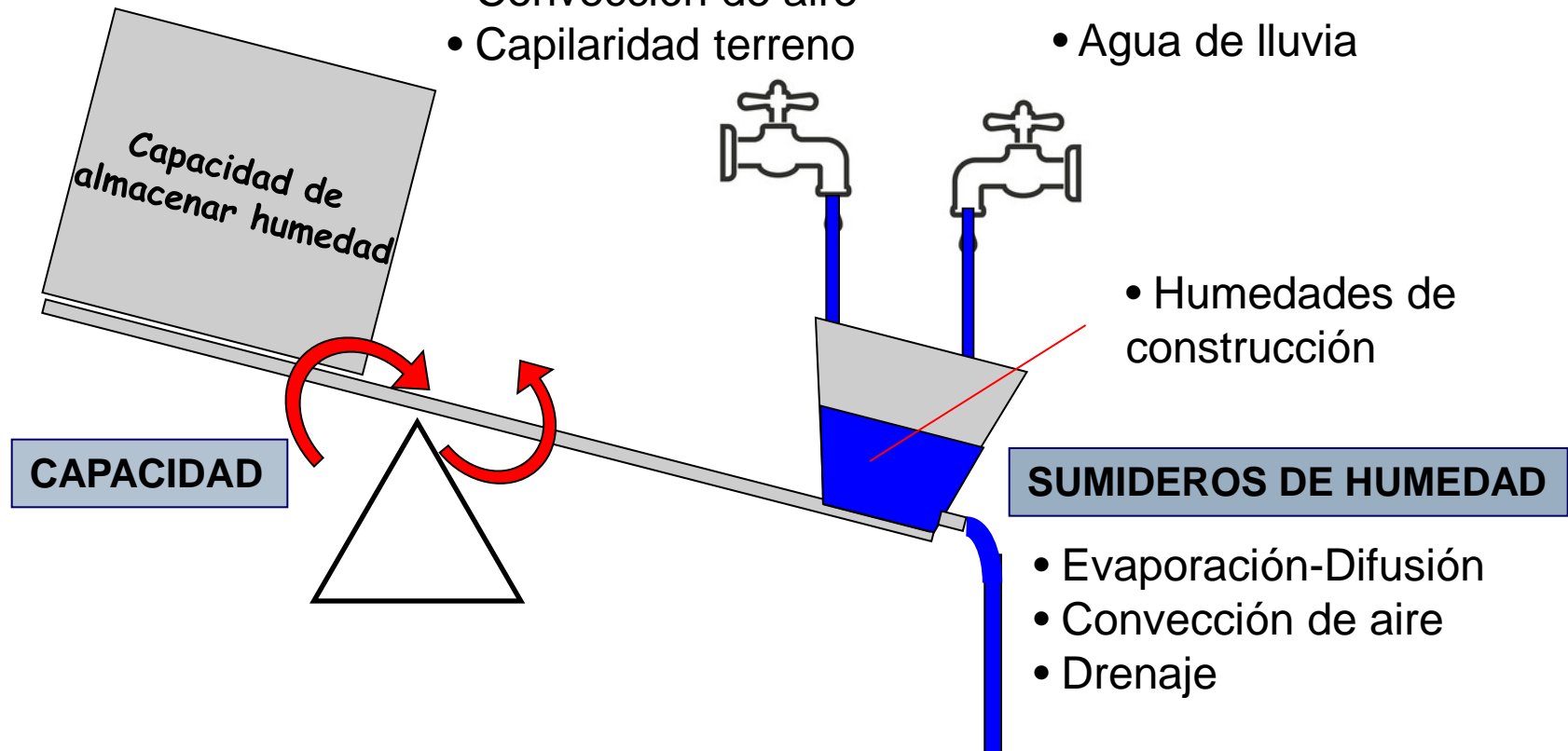


Balance higroscópico

FUENTES DE HUMEDAD

- Difusión de vapor
- Convección de aire
- Capilaridad terreno
- Agua de lluvia

- Humedades de construcción



SUMIDEROS DE HUMEDAD

- Evaporación-Difusión
- Convección de aire
- Drenaje



Balance higroscópico

FUENTES DE HUMEDAD

- Filosofía de diseño:
 - Modificar capacidad de almacenamiento
 - Eliminar fuentes
 - Compensarlas con sumideros

CAPACIDAD

SUMIDEROS DE HUMEDAD



Balance higroscópico

- Las soluciones constructivas tradicionales, con gran capacidad de almacenamiento de humedad, presentan una mayor inercia higroscópica.
- Sin embargo, la construcción moderna suele ser más ligera, con **menos capacidad de almacenamiento** y es **más impermeable al aire**, lo que la hace más sensible a las variaciones de las condiciones de temperatura y humedad.
- Resulta crítico controlar la cantidad de humedad a través del cerramiento y diseñarlo de modo que **dificulten el transporte capilar en fase líquida hacia el interior** y que **para secar faciliten la difusión del vapor de agua hacia el exterior**.



Tipos de humedad

- Humedades de construcción
 - Tiene su origen en la humedad inherente a los materiales de construcción durante el proceso de construcción. Es propia de estructuras de hormigón realizadas in situ.
 - Esta humedad, una vez fraguado el hormigón, debe evaporar hacia el exterior a través de **la estructura porosa** del material, hasta alcanzar el equilibrio con la humedad ambiental.
 - Este equilibrio higroscópico depende de la estructura porosa del propio material.



Tipos de humedad

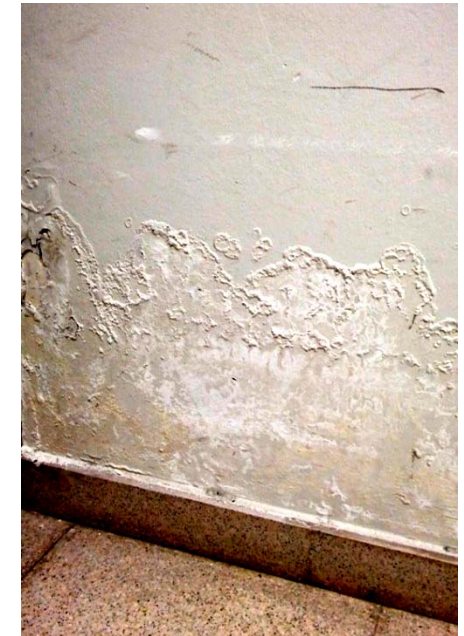
Humedades de construcción

- Si no se evapora esa humedad constructiva del cerramiento antes de aplicar los acabados superficiales y revestimientos, entonces el exceso de humedad puede producir degradaciones, desprendimientos, erosiones y eflorescencias.
- En las construcciones industrializadas basadas en elementos constructivos prefabricados que inician su vida útil secos, este tipo de humedades se reducen mucho.



Tipos de humedad

- Humedades del terreno
 - aparece como consecuencia del transporte capilar del agua del terreno a través de la estructura porosa de los cerramientos.



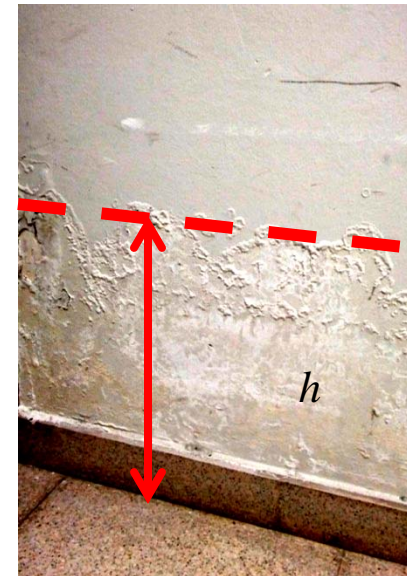


Humedades del terreno

- la fuerza motriz para dicho transporte capilar puede ser muy elevada en materiales de estructura de poros muy finos
- la distancia vertical a la que puede ascender la humedad del terreno por capilaridad es inversamente proporcional al radio del poro

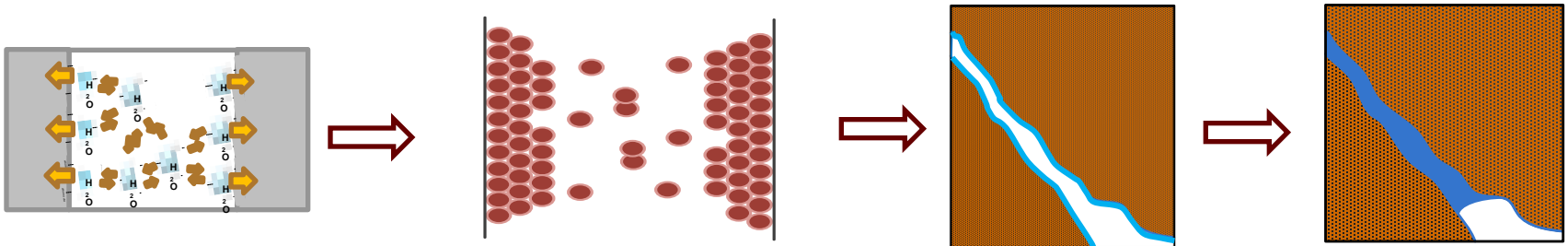
$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r \cdot \rho_l \cdot g} = \frac{2 \cdot 0,07258 \cos 0}{r \cdot 10^3 \cdot 9,81} = \frac{0,015 \cdot 10^{-3}}{r} \text{ m}$$

$$r = 1 \mu\text{m} \rightarrow h_{\text{max}} = 15 \text{ m}$$



Tipos de humedad

- Humedad higroscópica
 - Es la humedad **adsorbida/desorbida por las paredes de los poros** del material, en su búsqueda del equilibrio con la humedad relativa del aire ambiente



- Eventualmente, en los poros más finos puede dar lugar a condensaciones capilares (microscópicas) a medida que la humedad relativa aumenta y/o el tamaño del poro disminuye



Tipos de humedad

- Humedades de condensación
 - Son debidas a la condensación del aire húmedo sobre la superficie del cerramiento (**condensaciones superficiales**) o en el interior de los cerramientos (**condensaciones intersticiales**), cuando la temperatura del cerramiento desciende por debajo de la temperatura de saturación a la presión parcial del vapor de agua.



- El CTE contempla la necesidad de comprobación de dichas condensaciones en aquellos cerramientos que no empleen barreras de vapor .



IMPACTO DE LA HUMEDAD EN EL EDIFICIO



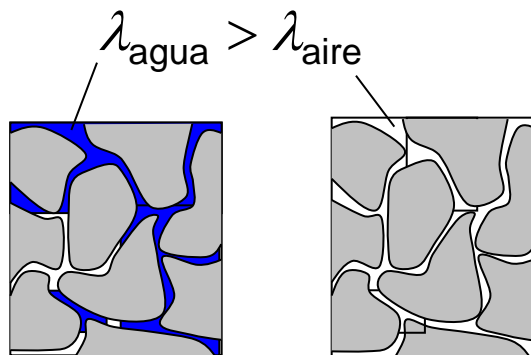
IMPACTO HUMEDAD EN EDIFICIO

- Impacto energético
 - Conductividad
 - Calor latente
- Impacto salubridad
- Impacto integridad
 - Eflorescencias
 - Criptoeflorescencias
 - Crioclastia
 - Carbonatación
 - Manchas-condensaciones superficiales



Impacto energético de la humedad

Humedad → Incrementa λ



$$\lambda_{húmedo} = \lambda_{seco} + cte \cdot w$$

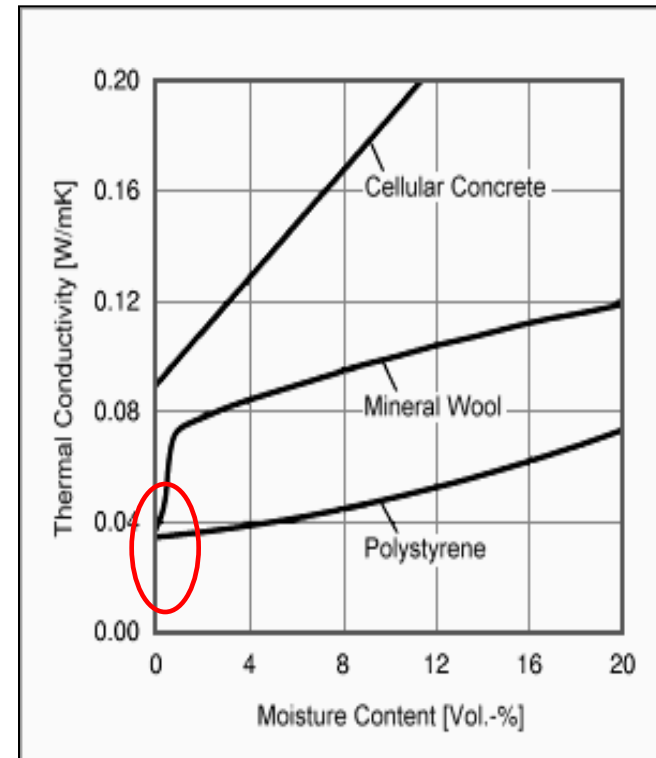


Figura: Fraunhofer Institute for Building Physics IBP – WUFI software

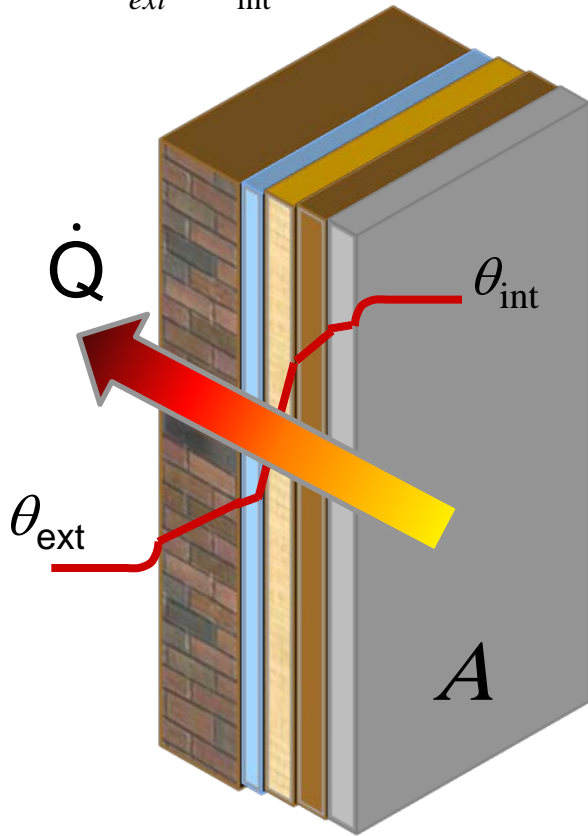


Aumento de la transmitancia del cerramiento

Impacto energético de la humedad

$$\Delta\theta = \theta_{ext} - \theta_{int}$$

$$\lambda_{húmedo} = \lambda_{seco} + cte \cdot w$$



$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{ext}} + \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_{in}}}$$

$$\dot{Q} = UA\Delta\theta$$

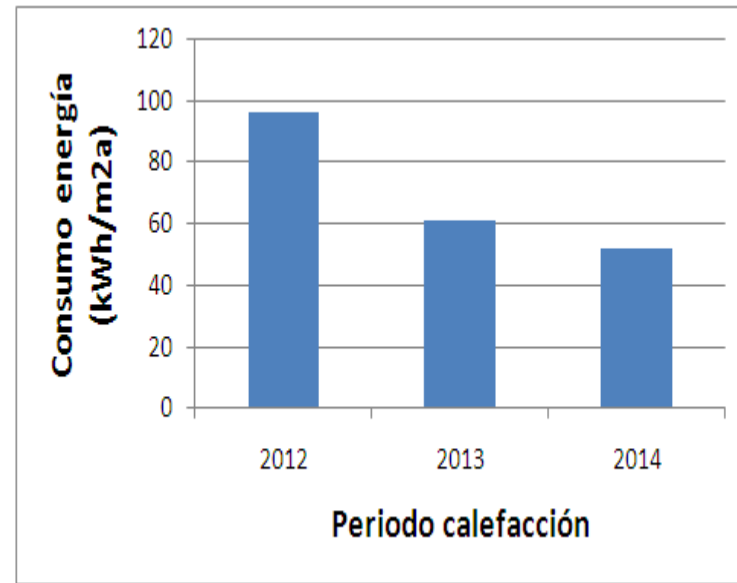
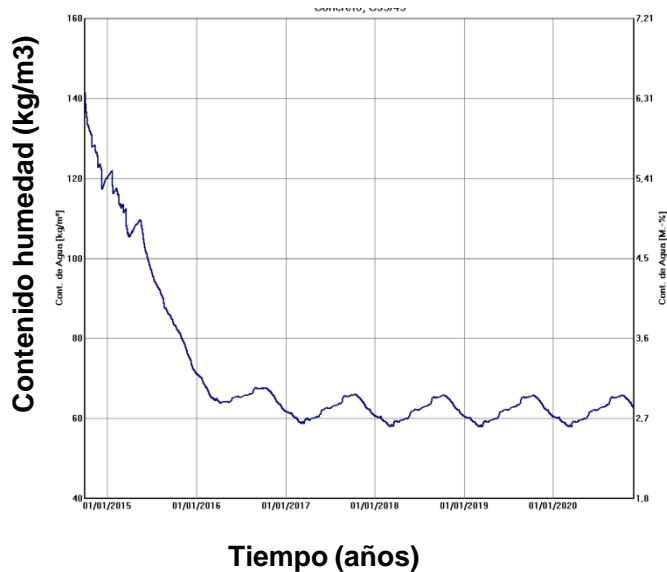
Nota: realmente, las mayores pérdidas por transmisión de calor se deben a las infiltraciones de aire y a los puentes térmicos. Otra forma de afectar a la U, es mediante la degradación del aislamiento con niveles altos de humedad.



Impacto energético de la humedad

Humedad → Efecto del calor latente de evaporación de la humedad en el cerramiento

Hasta alcanzar el equilibrio en el contenido de humedad, la evaporación del exceso de humedad en los cerramientos aumenta el consumo energético del edificio.





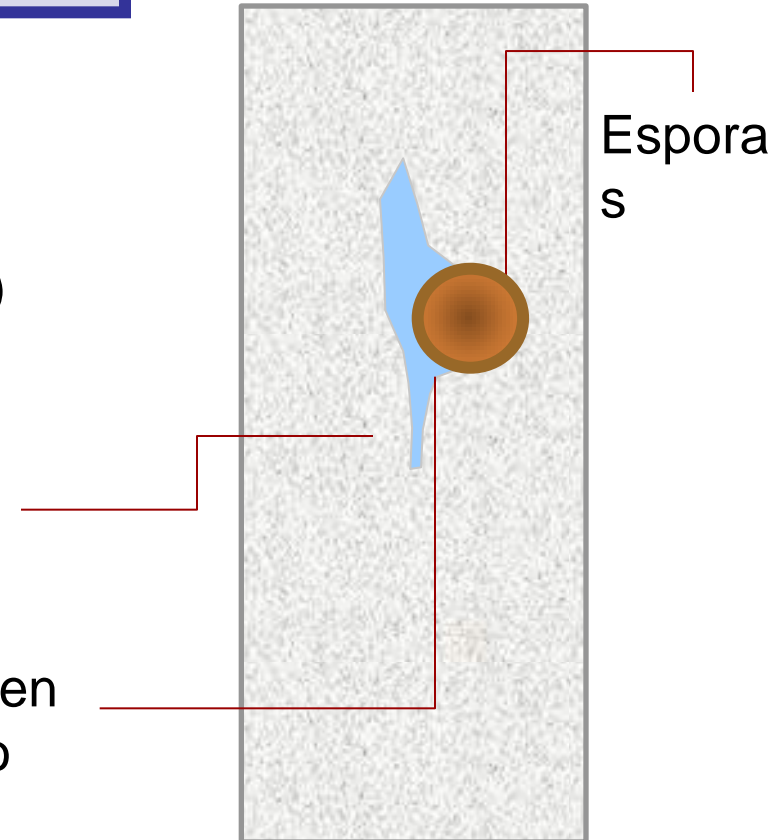
Impacto salubridad

germinación y crecimiento de mohos

- Esporas de hongos, conidia
- Oxígeno
- Temperatura propicia ($10^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$)
- Sustrato nutriente (aire interior)
- **AGUA**

Humedad
superficial, fuente
de nutrientes
Las enzimas se diluyen
en busca de alimento

Fase 1: Germinación esporas (conidia).

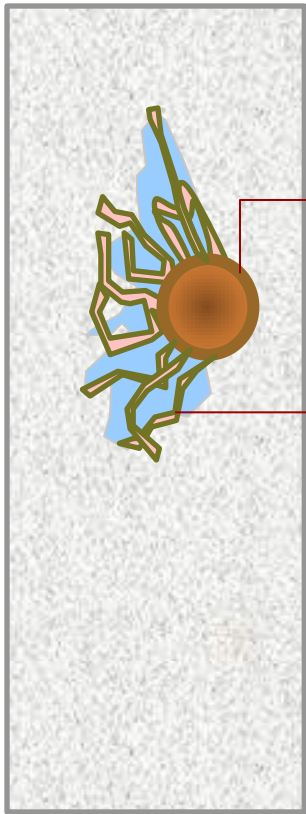




Impacto salubridad

germinación y crecimiento de mohos

Fase 2: Crecimiento filamentos (hyphae)

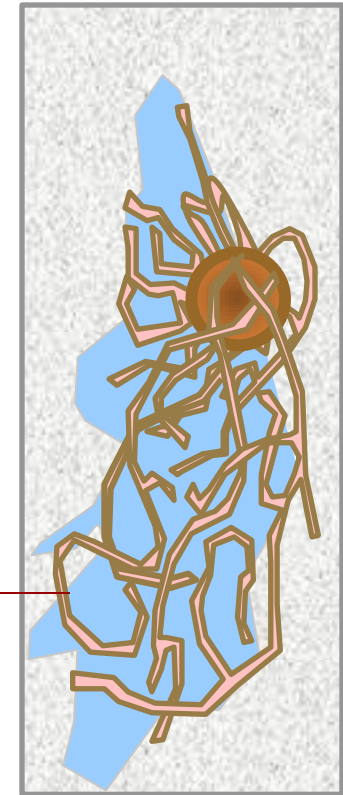


Esporas germinan produciendo filamentos (hyphae)

Los hyphae se extienden aumentando área absortiva

Los hyphae crecen rápidamente creando un manto protector (mycelium) que mantiene la humedad superficial

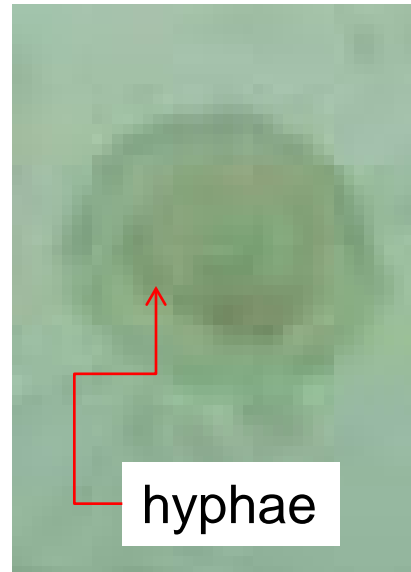
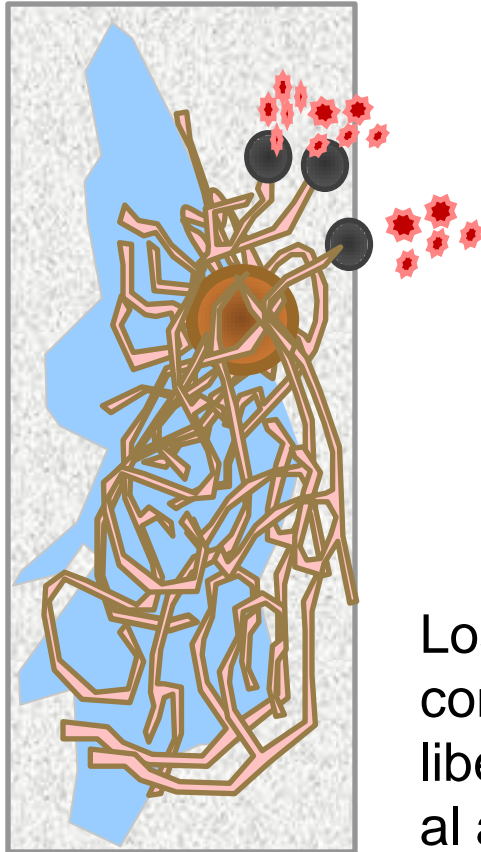
Fase 3: Crecimiento manto (mycelium)





germinación y crecimiento de mohos

Fase 4: Florecimiento conidia



Los mohos desarrollan conidia, que genera y libera nuevas esporas al aire.



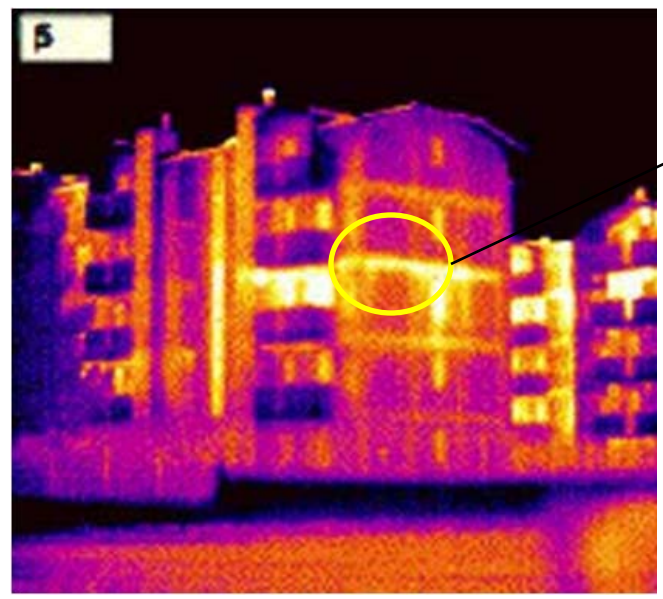
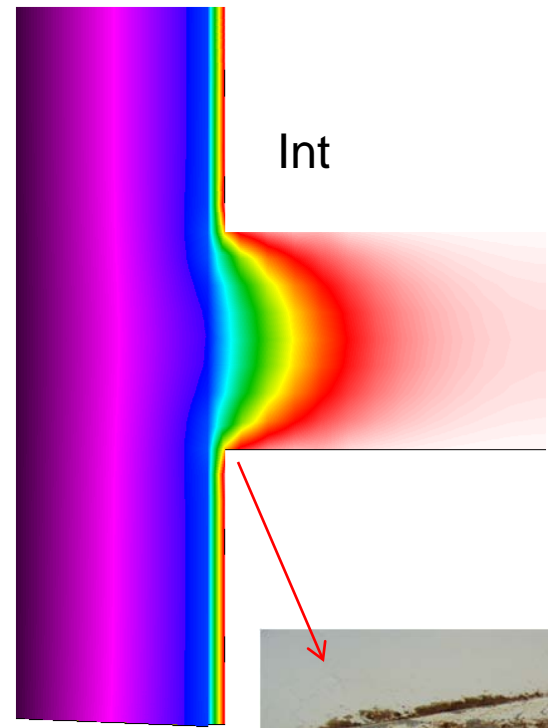


germinación y crecimiento de mohos

PUENTES TÉRMICOS: Puntos fríos

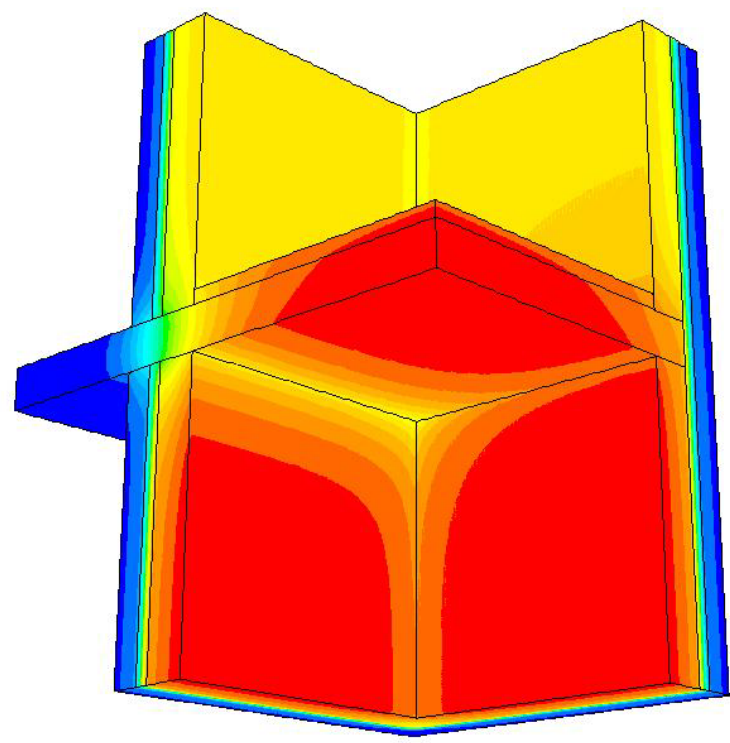
Ext

Int





Germinación y crecimiento de mohos. Puntos críticos: PUENTES TÉRMICOS





Impacto en la Integridad

El impacto sobre la integridad del cerramiento consiste en el **deterioro de las prestaciones** y en una **degeneración estructural** de los materiales del cerramiento que se puede expresar mediante diversas patologías:



Impacto en la Integridad

▪ PATOLOGÍAS

- Eflorescencia
- Criptoeflorescencia

degradación por cristalización y posterior dilatación de las sales solubles

▪ Heladicidad

fractura por ciclos de hielo/deshielo, actuando los cristales de hielo de forma similar a los cristales de las sales

▪ Descomposición

por carbonatación y posterior corrosión del hormigón armado

▪ Manchas

Modificaciones cromáticas, pátinas, costras



Haloclastia

- La humedad arrastra las sales solubles de los materiales y del terreno, y durante los periodos de secado, se evapora el agua, cristalizando las sales.
- Si estos cristales absorben la humedad ambiente, vuelven a diluirse y propagarse, y **al volver a cristalizar y nuevamente humedecerse, los cristales de estas sales se dilatan.**
- **Durante sucesivos ciclos de secado** (formación cristales) y humedecimiento (absorben vapor de agua y dilatan), la dilatación progresiva de los cristales genera elevadas presiones en los poros (100-200 MPa) → deterioro del material.



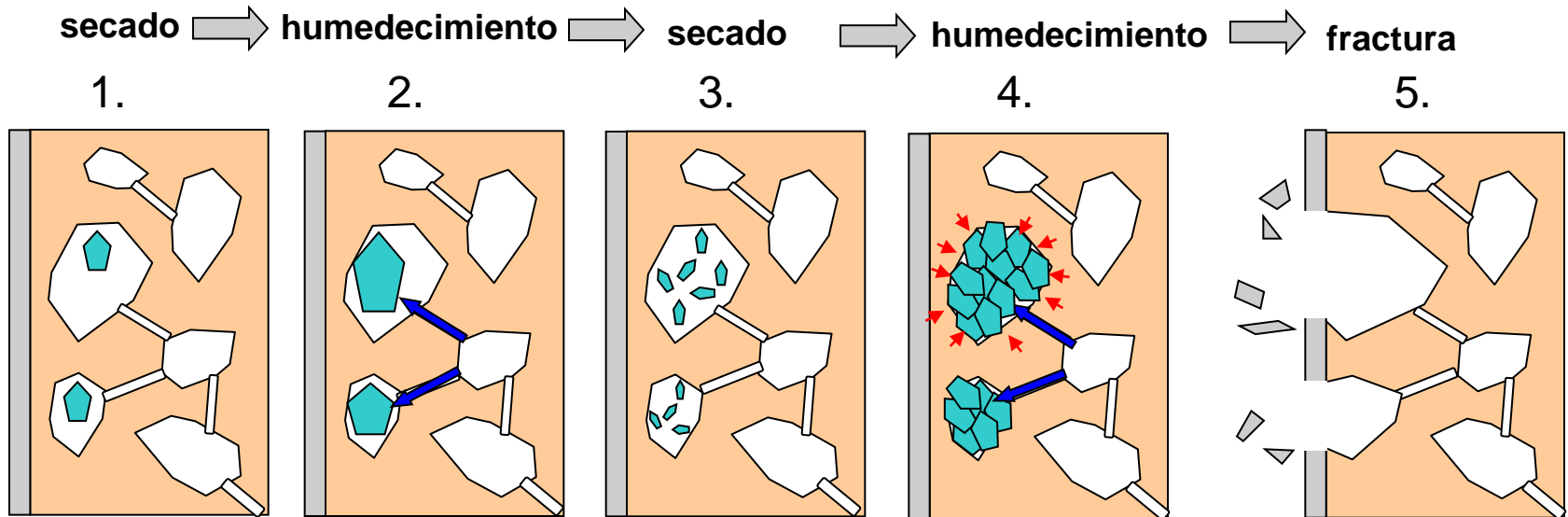
Haloclastia

- Dependiendo de la solubilidad de la sal, la cristalización puede darse:
 - en el interior del material, desagregando interiormente los componentes del cerramiento.
 - a escasos centímetros de la superficie exterior, con desprendimiento del revestimiento (**criptoflorescencia**).
 - en la superficie (**eflorescencia**).



Criptoflorescencia

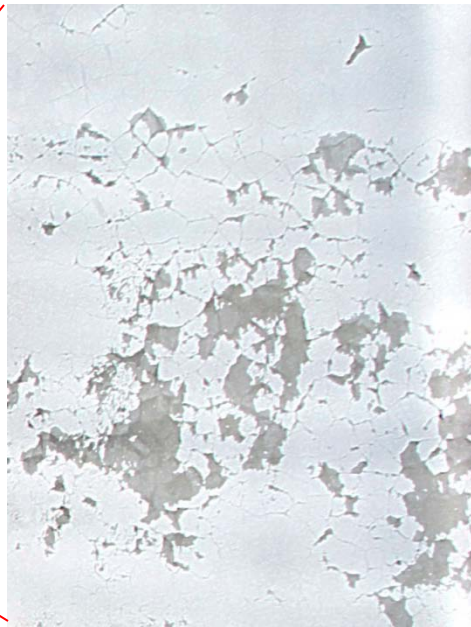
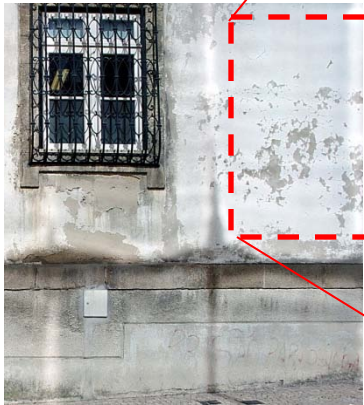
1. Formación de sales en el interior del poro
2. Crecimiento del cristal al absorber humedad
3. Fractura del cristal
4. Nuevo crecimiento de las partículas del cristal
5. Rotura del poro y desprendimiento del revestimiento





Criptoflorescencia

- Como consecuencia de la ruptura del poro en la proximidad del revestimiento exterior, se produce pérdida de adherencia y caída del mismo.





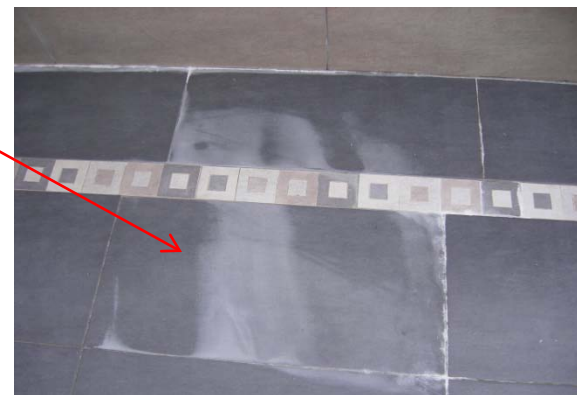
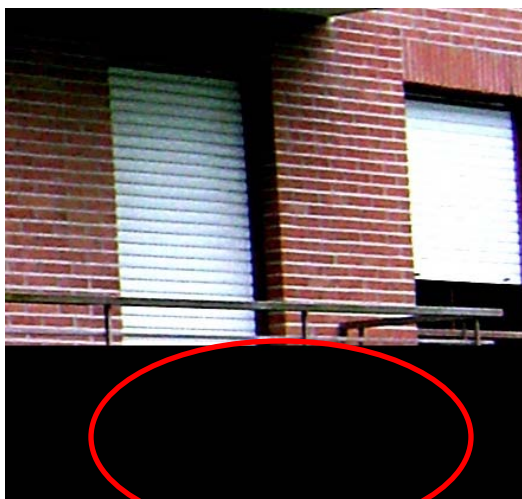
Criptoflorescencia





Eflorescencia

- Aparición de depósitos cristalinos blancos (carbonato cálcico)





Crioclastia

- Los ciclos de hielo/deshielo producen daños similares por aumento de volumen (9 %), actuando los cristales de hielo de forma similar a los cristales de las sales.
- Pueden darse ambos fenómenos combinados



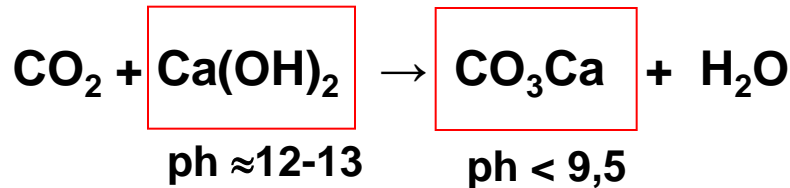
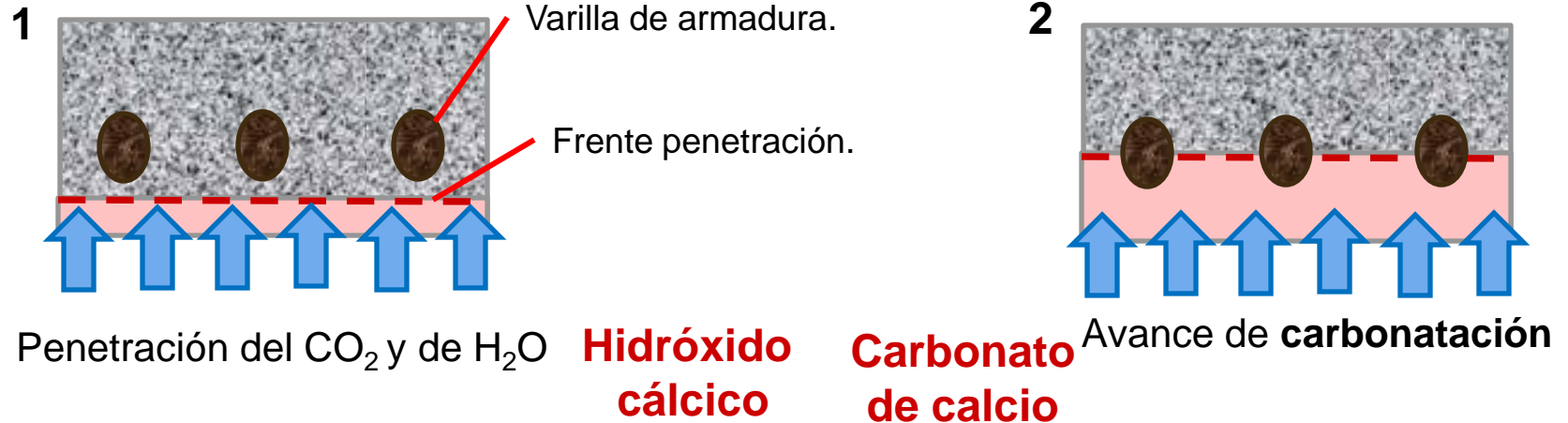
Los factores decisivos son:

- la frecuencia en las oscilaciones de temperatura alrededor del punto de congelación
- la amplitud del rango sobre-capilar



Descomposición por carbonatación

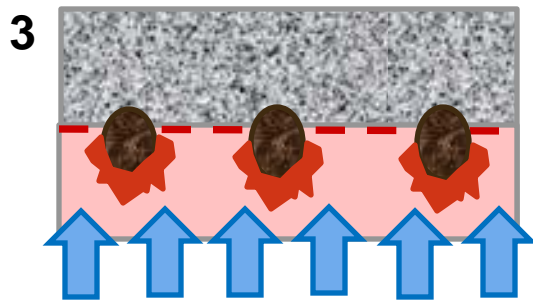
- Al penetrar el dióxido de carbono y la humedad presentes en el aire entre los poros del hormigón, se produce la carbonatación del hidróxido cálcico que protege las armaduras de la corrosión con su alta alcalinidad, con lo que la armadura queda desprotegida a la corrosión.



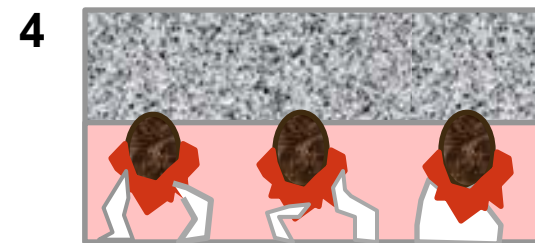


Descomposición por carbonatación

- Al iniciarse la oxidación de la armaduras, estas dilatan y provocan fisuras en el hormigón que las rodea, con lo que se aumentan los canales para el paso de más CO_2 y humedad.
- El proceso continua, hasta la disgregación de pedazos de hormigón y su descomposición, quedando a la vista la armadura y por lo tanto totalmente vulnerable a la corrosión del ambiente



+ humedad = **corrosión** → expansión → fisuras



atmósfera agresiva+humedad →
disgregación y descomposición



Descomposición por carbonatación



Imagen: P. Moreno

Varilla de armadura oxidada, al descubierto por descomposición del hormigón por carbonatación.

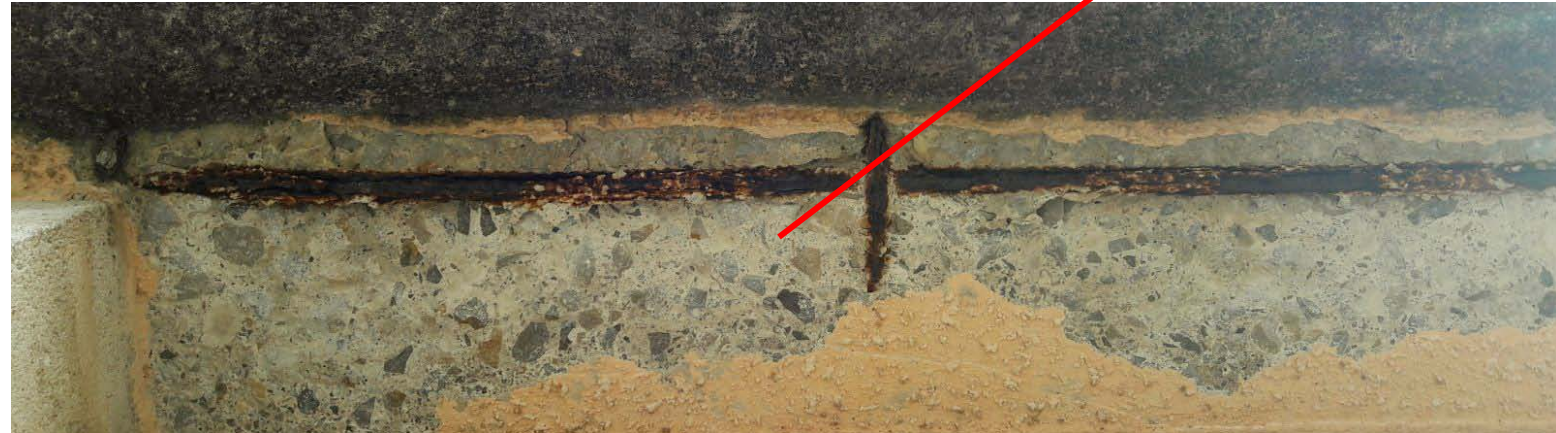


Imagen: P. Moreno



Manchas

Lavado de pintura por lluvia



Imagen: Miriam Gómez

Cornisa sin vierteaguas o mal ejecutado



Imagen: Bert Blocken, Eindhoven University of Technology & KU Leuven

Agua de lluvia no evaporada



Imagen: Bert Blocken, Eindhoven University of Technology & KU Leuven



Chorretones por falta de cornisa



Condensaciones en superficies exteriores

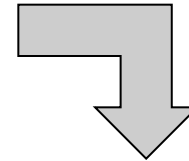


Condensaciones
superficiales durante el
enfriamiento nocturno
de la fachada



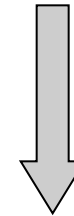
Impacto humedad sobre edificio:

- rendimiento
- mantenimiento
- vida útil

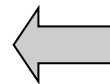


Costes/Contaminación asociados

Criterios de sostenibilidad



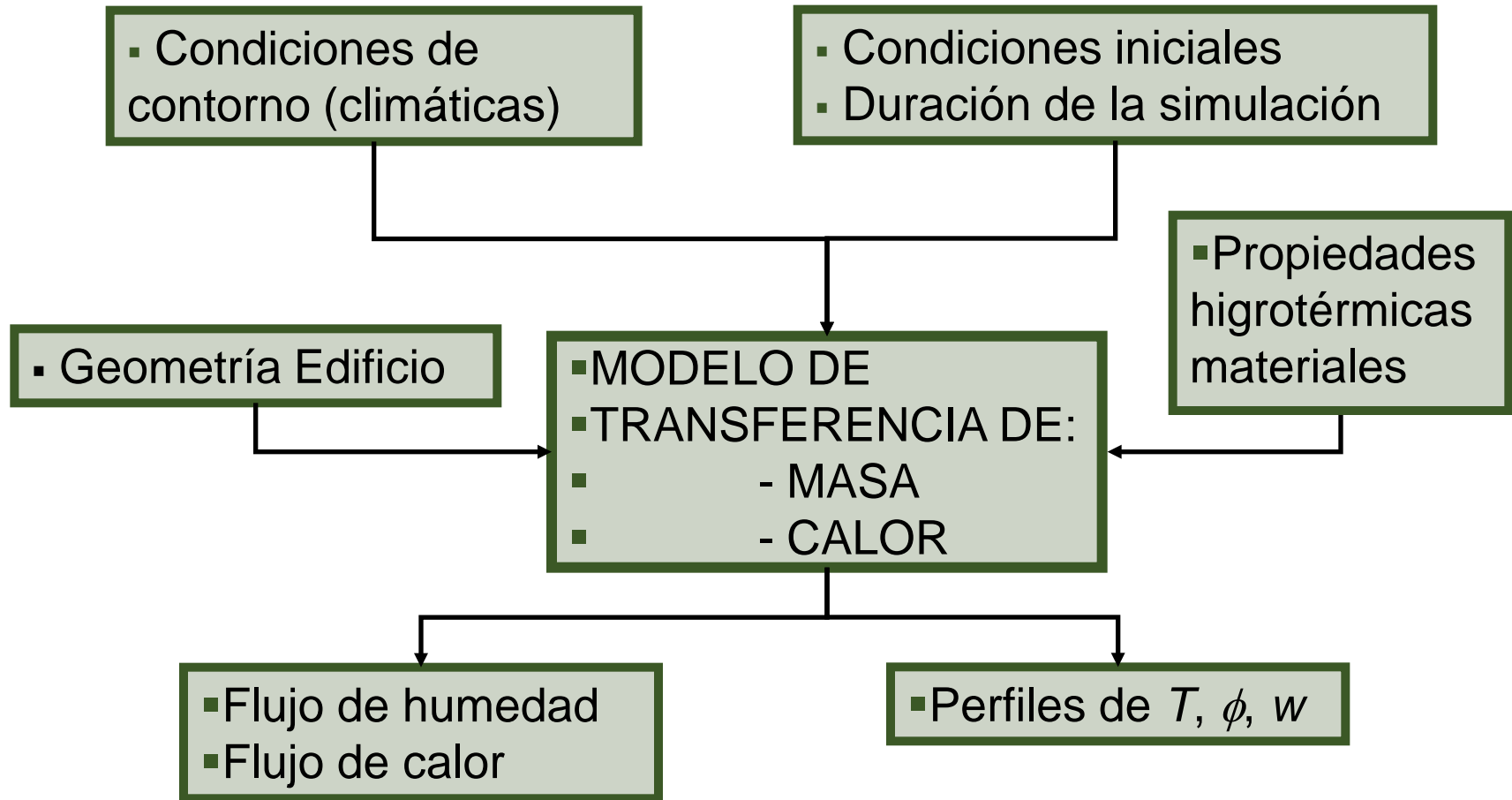
Herramientas
de simulación



- predecir la influencia de la humedad en:
 - la transmitancia de los cerramientos
 - en la aparición de condensaciones
 - en el deterioro mecánico y químico

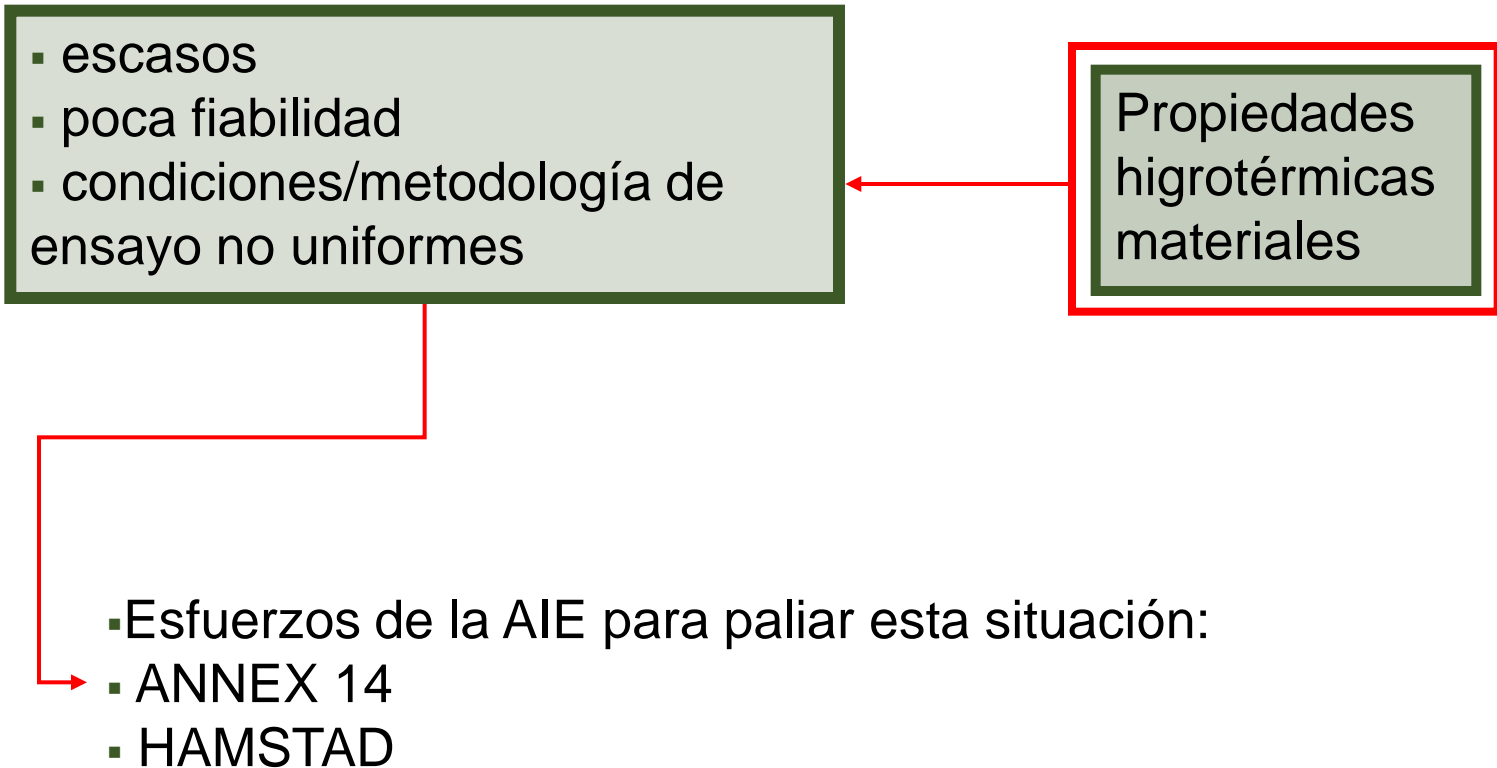


Herramientas de simulación





Herramientas de simulación





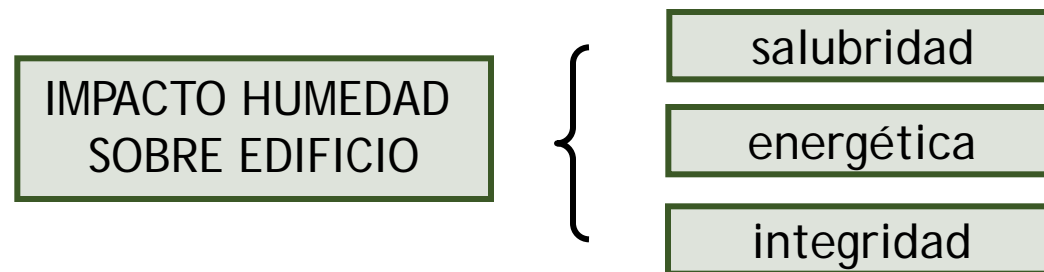
La humedad en el CTE

- Exigencia básica HE1: limitación de la demanda energética
 - “los edificios dispondrán de una **envolvente** de tales características **que límite la demanda energética necesaria para alcanzar el bienestar térmico (...)** **reduciendo el riesgo de aparición de humedades** de condensaciones superficiales e intersticiales”
 - “Los cerramientos se construirán de forma **que no presenten humedades de condensación** en su superficie interior, ni dentro de la masa del cerramiento que degraden sus condiciones, así como tampoco las esporádicas que causen daños a otros elementos.”



La humedad en el CTE

- Las **condensaciones superficiales** en los *cerramientos* y *particiones interiores* que componen la *envolvente térmica* del edificio, se limitarán de forma que **se evite la formación de mohos** en su superficie interior.
- Las **condensaciones intersticiales** que se produzcan en los *cerramientos* y *particiones interiores* que componen la *envolvente térmica* del edificio serán tales que **no produzcan una merma** significativa en sus prestaciones térmicas o supongan un **riesgo de degradación** o pérdida de su vida útil.





PROPIEDADES DE LOS MEDIOS POROSOS



DESCRIPCIÓN MEDIO POROSO

- Aproximación de medio continuo
- Volumen elemental representativo
- Distribución de tamaño de poros

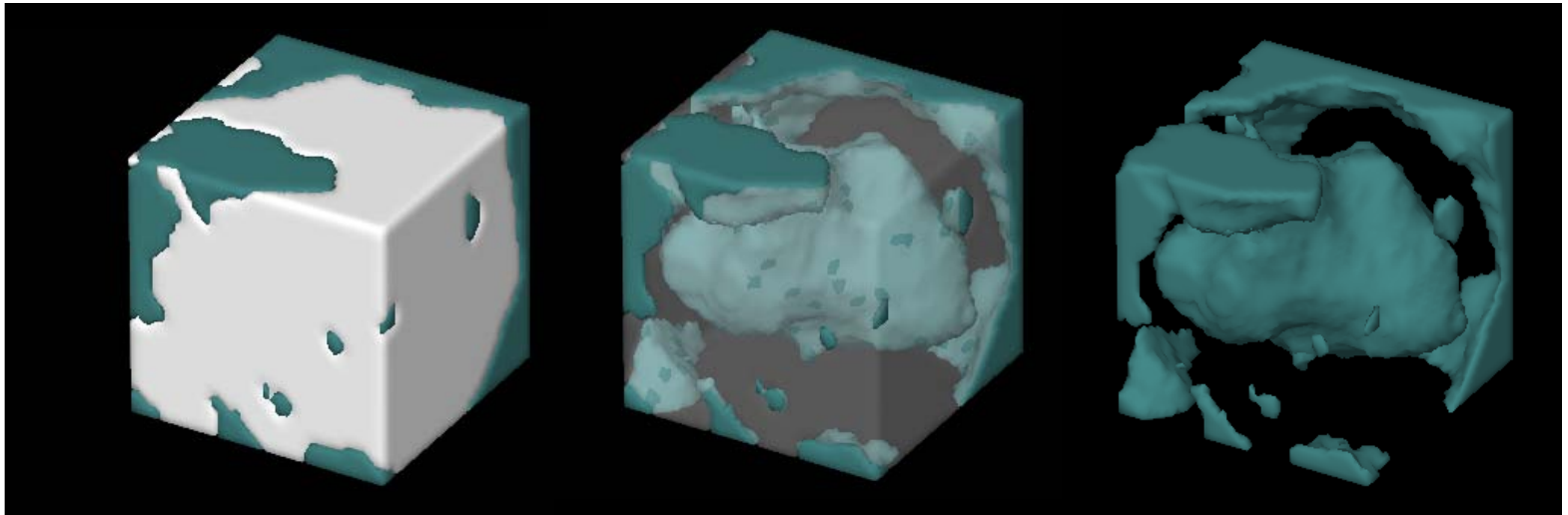


Imagen: Anderson Camargo – LMPT – Universidade Federal de Santa Catarina



Descripción de medio poroso

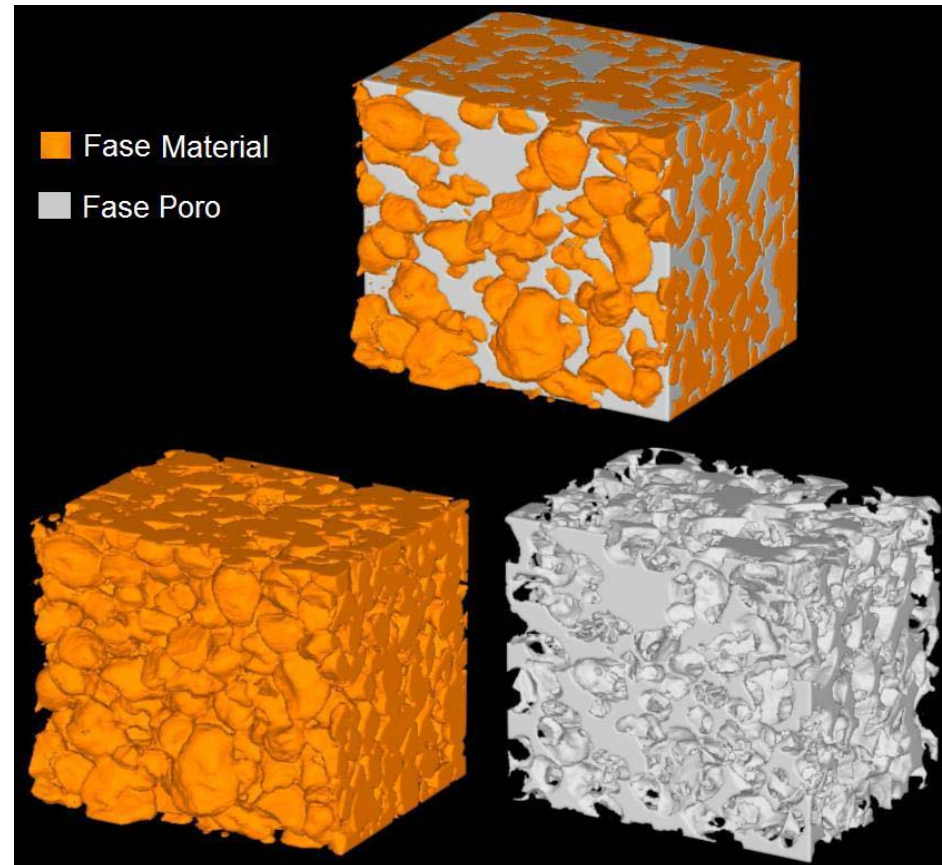


Imagen: Anderson Camargo – LMPT – Universidade Federal de Santa Catarina



Descripción de medio poroso

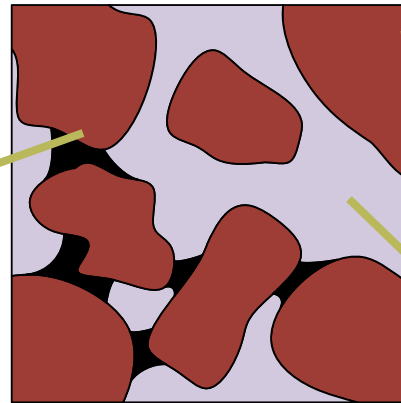
medio poroso = superposición de medios continuos

medio poroso

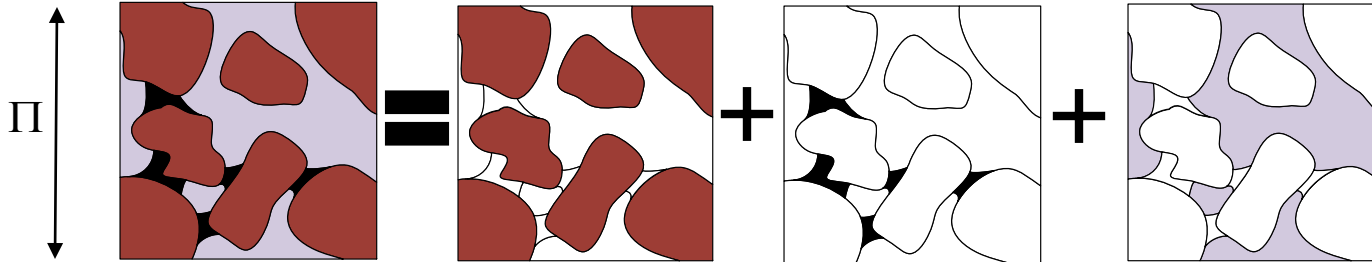
fase líquida

fase sólida

fase gaseosa



Medio poroso = fase sólida + fase líquida + fase gaseosa



V.E.R.



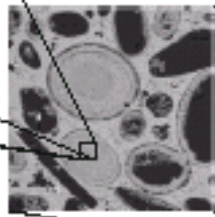
Descripción de medio poroso

Se pueden adoptar diferentes niveles de observación para el estudio de un medio poroso

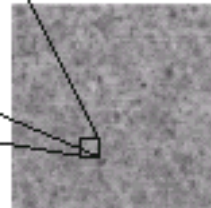
Nivel
microscópico



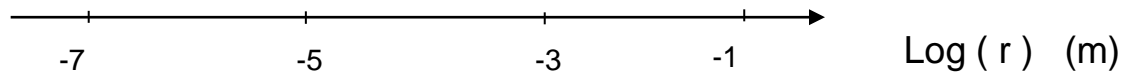
Nivel
mesoscópico



Nivel
macroscópico



Nivel
continuo



Imágenes: Staf Roels, Jan Carmeliet. KU Leuven



Descripción de medio poroso

Aproximación de medio continuo: Las propiedades microscópicas se reemplazan por **propiedades promedio**, de modo que varían de forma **continua** a lo largo del medio.

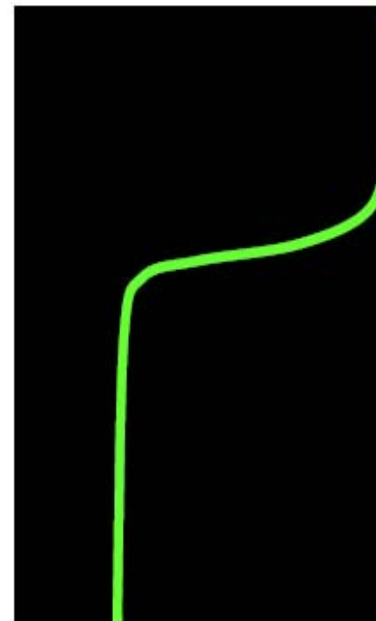
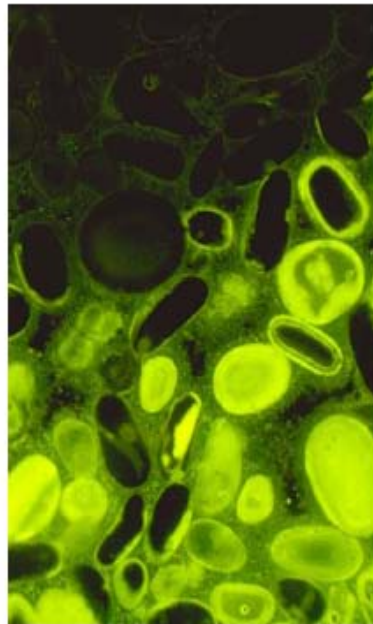


Imagen: Staf Roels. KU Leuven



Descripción de medio poroso

V.E.R.: volumen elemental representativo

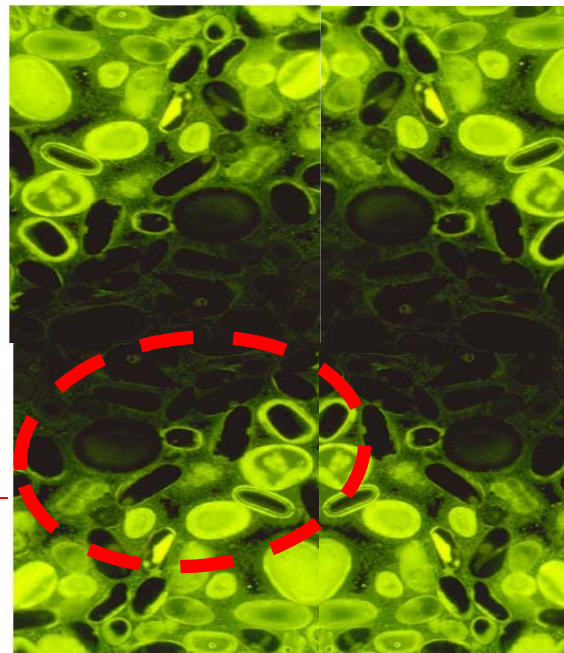
nivel
microscópico



aproximación de
medio continuo

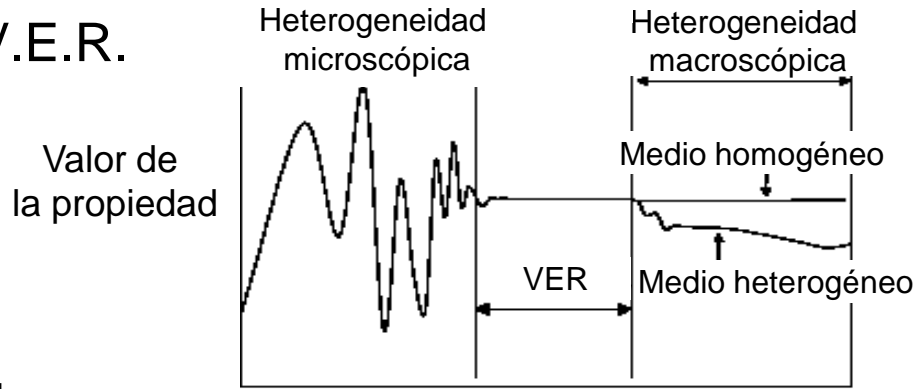
V.E.R.: mínimo volumen
para el que no hay variación
estadística significativa en
las propiedades

V.E.R.





Tamaño del V.E.R.



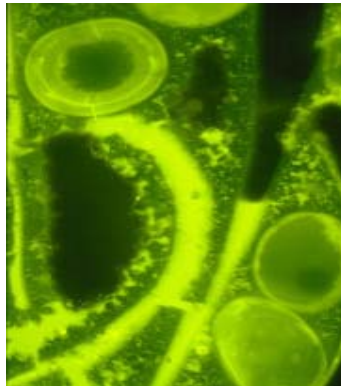
d = longitud característica microscópica

$$d \ll \pi \ll L$$

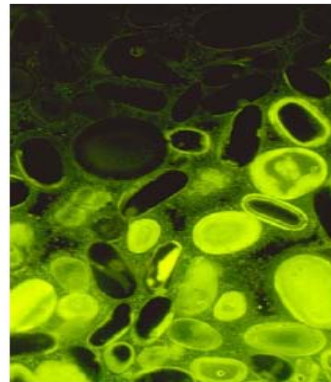
L = longitud característica macroscópica

Heterogeneidad microscópica

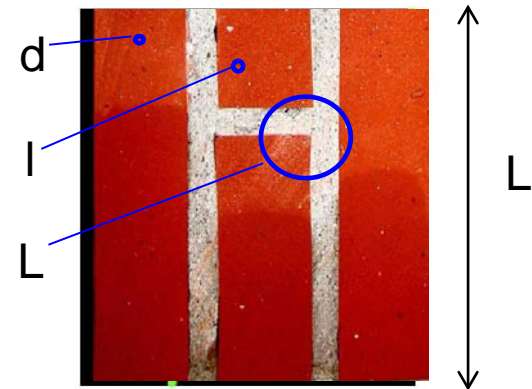
d



Tamaño del volumen de promediado



Heterogeneidad macroscópica



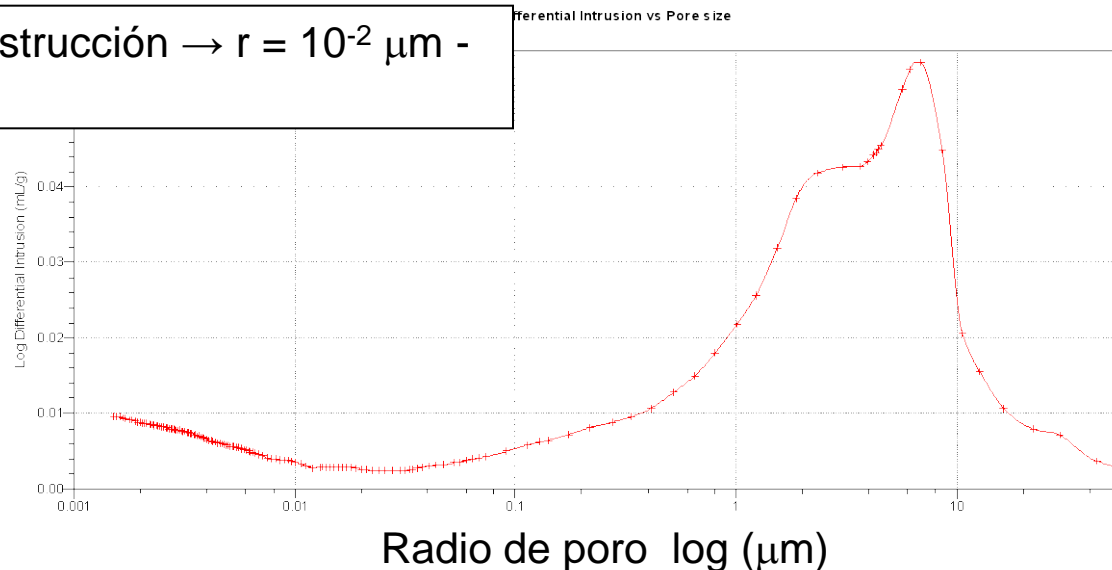
Imágenes: Staf Roels. KU Leuven



Distribución de volumen de poro

- Se considera el sistema de poros como un conjunto de tubos capilares de diferente radio interconectados entre sí.
- La ley de distribución de los poros en función de su tamaño adquiere por lo tanto gran importancia → distribución de tamaño de poro

materiales de construcción → $r = 10^{-2} \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$





FUNDAMENTOS



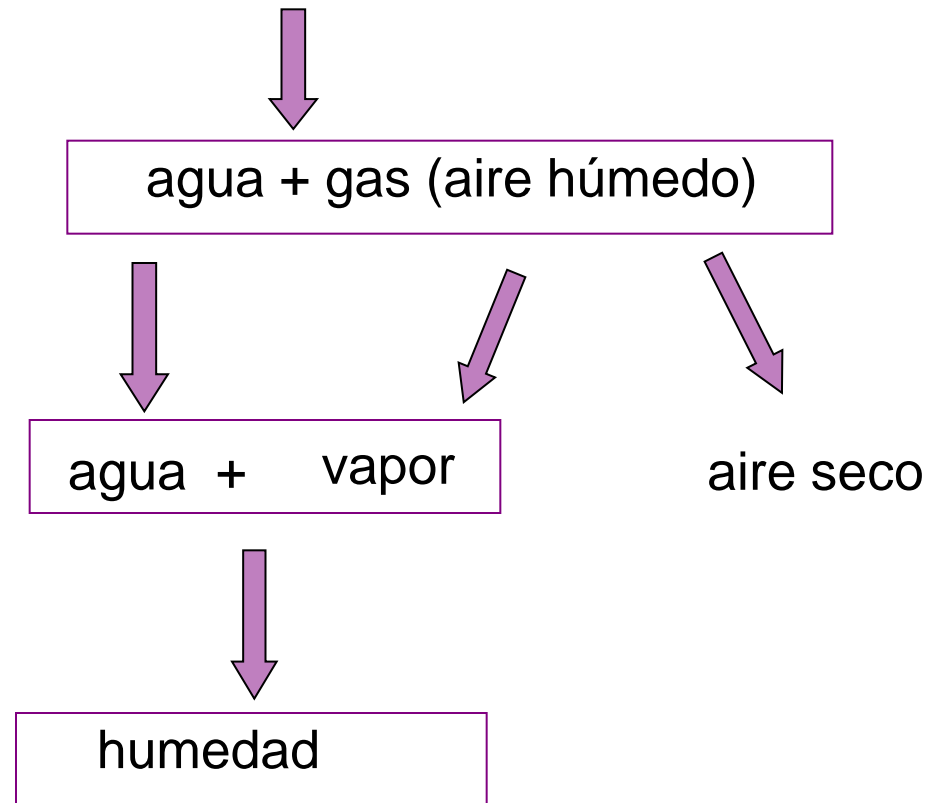
FUNDAMENTOS

- Contenido de humedad
- Propiedades básicas
- Mecanismos de almacenamiento de humedad
 - Adsorción molecular
 - Condensación capilar
- Mecanismos de transporte de humedad
 - Difusión de vapor
 - Transporte capilar



Humedad en medio poroso

Medio poroso : matriz sólida + espacio de poros





Propiedades básicas

- Contenido de humedad. w , u , ψ

$$w = \frac{m_{\text{humedad}}}{V_{\text{sec o}}}$$

(kg/m³)

materiales con un comportamiento higroscópico medio (piedras, arcillas, etc)

$$\psi = \frac{V_{\text{humedad}}}{V_{\text{sec o}}}$$

(m³/m³)

materiales muy porosos, con muy baja densidad (lanas de vidrio, etc) , ligeros

$$u = \frac{m_{\text{humedad}}}{m_{\text{sec o}}}$$

(kg/kg)

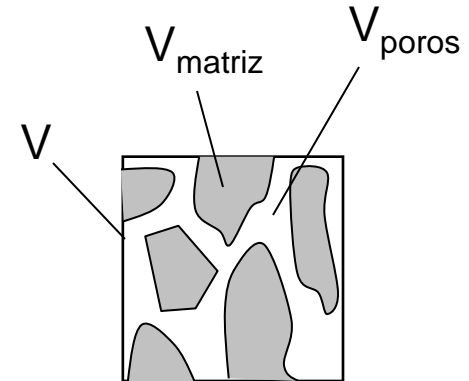
materiales muy higroscópicos (madera)



Propiedades básicas

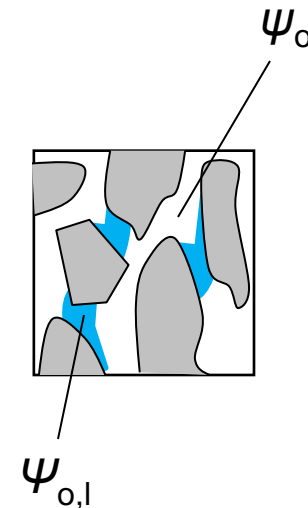
- porosidad abierta

$$\psi_0 = \frac{V_{poros}}{V}$$



- grado de saturación

$$S_l = \frac{w_l}{w_{sat}} = \frac{\psi_{0,l}}{\psi_0}$$





Propiedades básicas

$$\left. \begin{array}{l} \text{Contenido de agua líquida: } w_l = \psi_o \cdot S_l \cdot \rho_l \\ \text{Contenido de vapor de agua: } w_v = \psi_o \cdot (1 - S_l) \cdot \rho_v \end{array} \right\}$$

Contenido de humedad:

$$W_w = W_v + W_l$$

En la escala continua resulta muy difícil diferenciar tanto teórica como experimentalmente la fase vapor de la fase líquida



Propiedades básicas

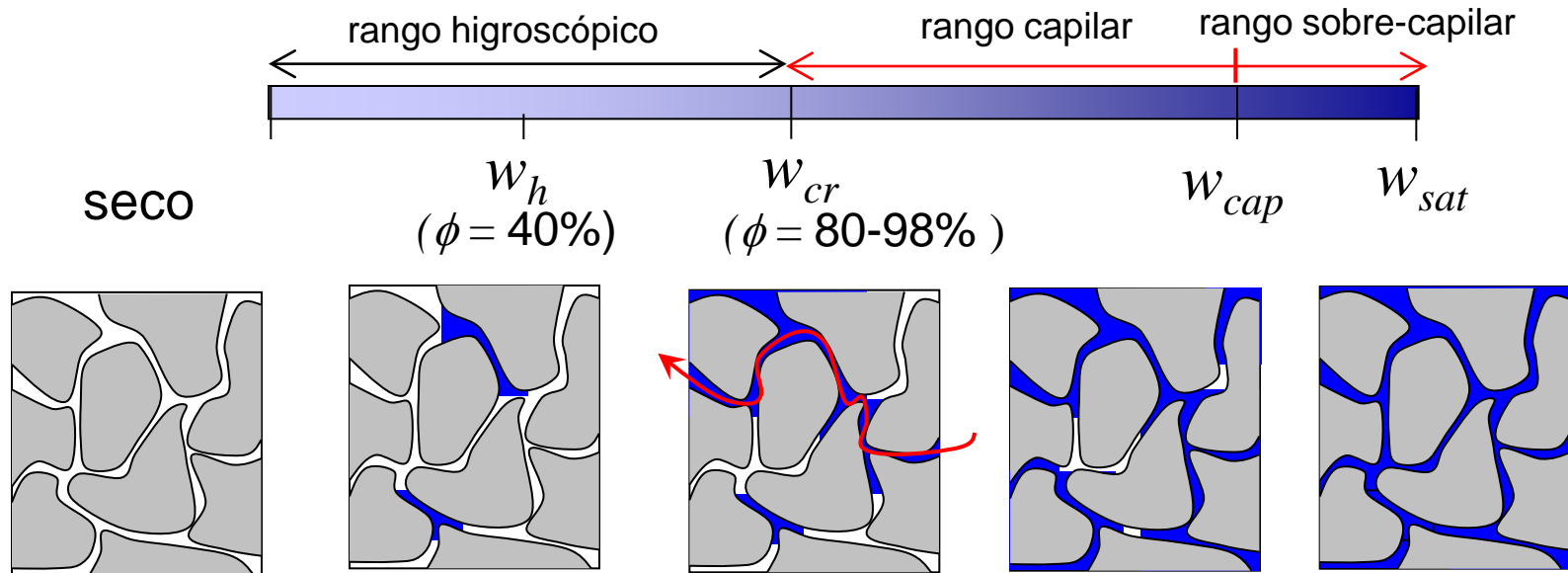
- densidad bruta $\rho_b = \frac{m_{\text{sec o}}}{V}$

- densidad de partícula $\rho_P = \frac{m_{\text{sec a}}}{V_{\text{matriz}}} = \frac{m_{\text{sec a}}}{V - V_{\text{poros}}} = \frac{m_{\text{sec a}}}{V(1 - \psi_0)}$

- A_w (kg/m²s^{1/2}) coeficiente de absorción capilar



Contenido de humedad de un medio poroso



w_h : contenido de humedad higroscópica (se inicia la condensación capilar)

w_{cr} : contenido de humedad crítico (se forma una fase líquida continua)

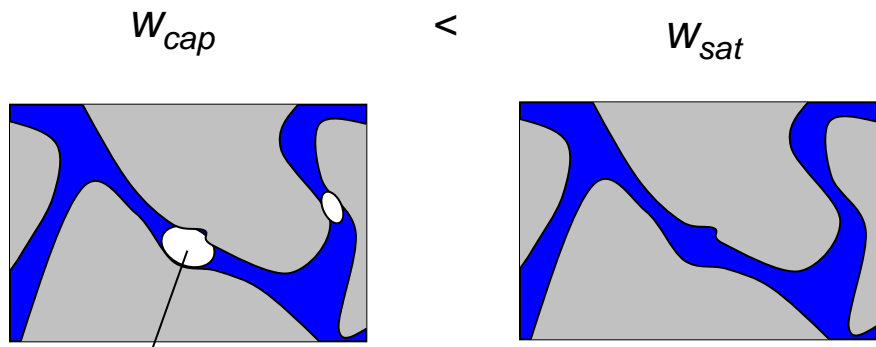
w_{cap} : contenido de humedad capilar (máximo contenido de humedad por capilaridad)

w_{sat} : contenido de humedad de saturación (poros totalmente inundados, sin aire)



Contenido de humedad

- w_{sat} contenido de humedad por saturación en vacío (kg/m^3)
- w_{cap} contenido de humedad por saturación capilar (kg/m^3)

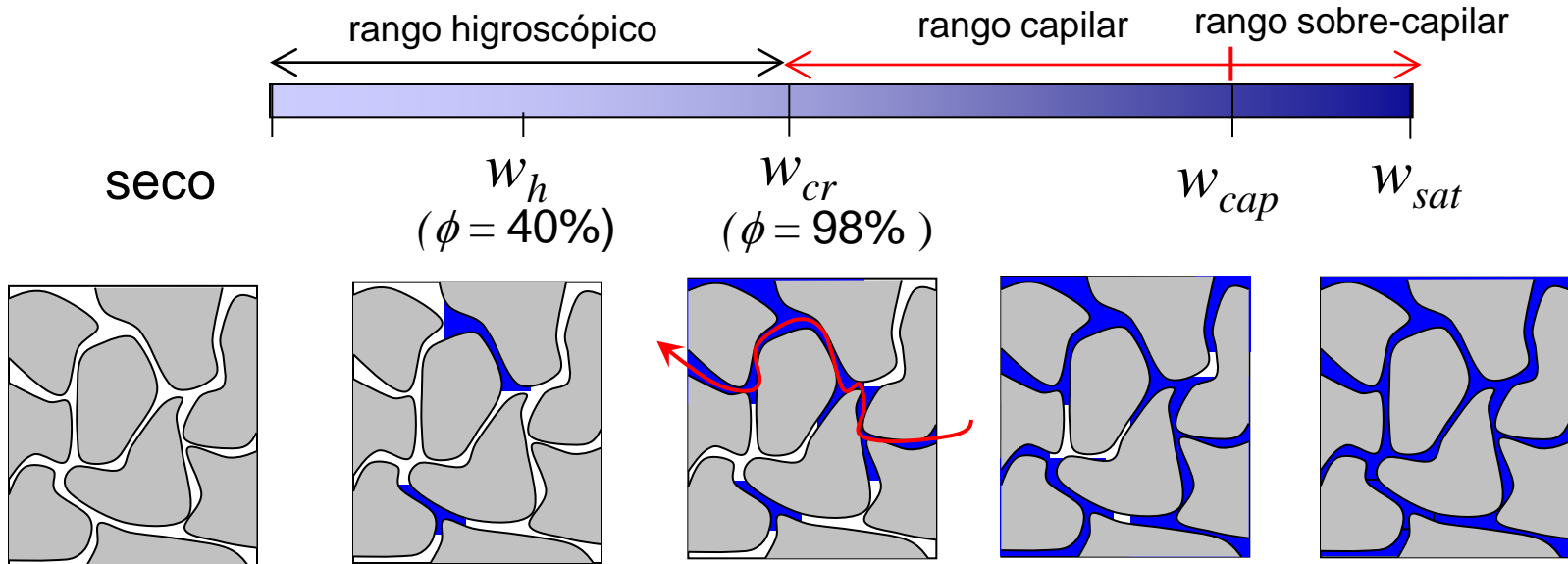


Aire atrapado en los poros

$$w_{sat} = \psi_o \cdot \rho_l$$



Contenido de humedad de un medio poroso



- Régimen higroscópico:
 - **difusión vapor**
 - Interés: condensaciones, germinación mohos, corrosión

- Régimen capilar:
 - **capilaridad**
 - Interés: agua de lluvia, agua del terreno, corrosión

- Régimen sobre-capilar:
 - **difusión aire atrapado**
 - Interés: materiales inicio vida saturados (cementosos), daños por congelación, atrapamiento de aire



Mecanismos de almacenamiento de humedad

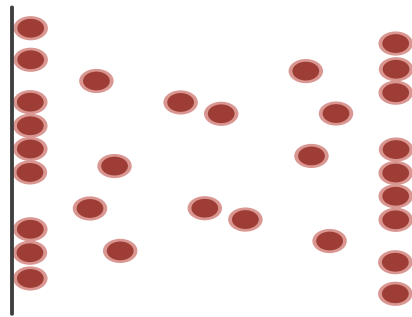
- Adsorción molecular ($\phi = 0-40 \%$)
- Condensación capilar ($\phi > 40 \%$)



- Adsorción molecular ($\phi = 0-40 \%$)

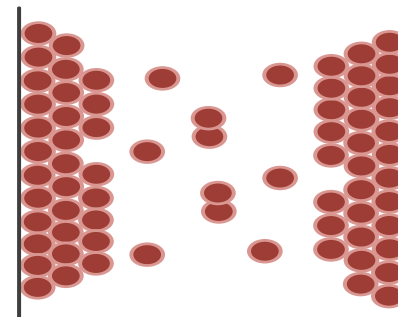
las moléculas de agua se adhieren/desprenden de las paredes de los poros, formándose una capa de moléculas sobre la superficie

$\phi \downarrow$



adsorción
mono-molecular

$\phi \uparrow$



adsorción
multi-molecular

■ Adsorción molecular

$W_{\text{adsorbida}} = f(A_{\text{pared poros}}/V_{\text{poros}}) \rightarrow$ los materiales de poro fino muestran un comportamiento más higroscópico que los de poro grande

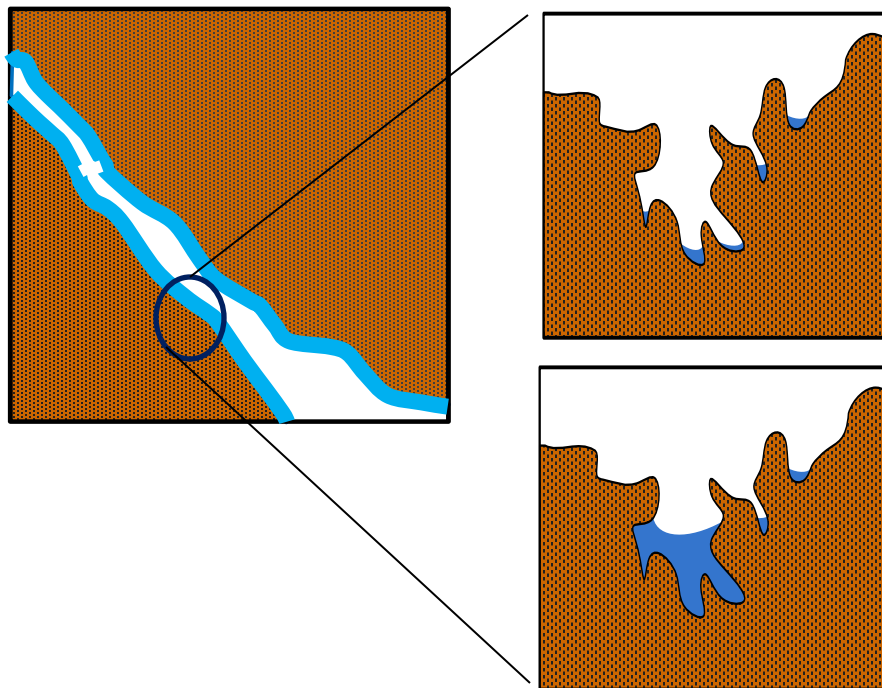
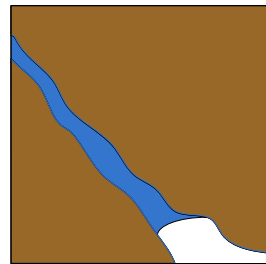
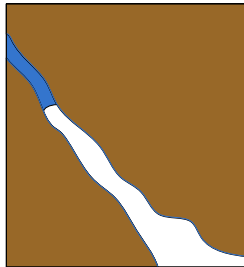


Imagen: Staf Roels. KU Leuven



- Condensación capilar ($\phi > 40\%$)

Al aumentar el espesor de las capas de agua adsorbida en las zonas más estrechas de los poros, pueden pasar a una **disposición de** mayor estabilidad y **menor nivel energético** estableciendo el contacto entre ellas y formando un **menisco** entre la fase líquida y la fase gaseosa



Adsorción
molecular

Menisco

Condensación
capilar

Imagen: Staf Roels. KU Leuven



Interfaz sólido-líquido-gas →

- F. adhesión
- F. cohesión

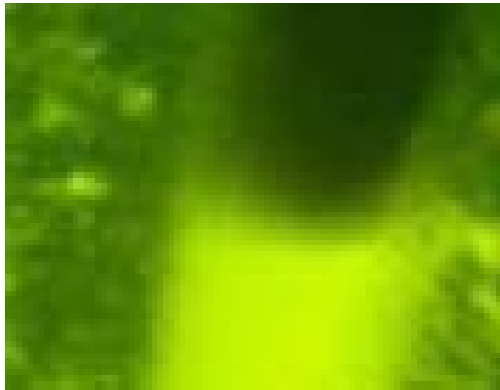
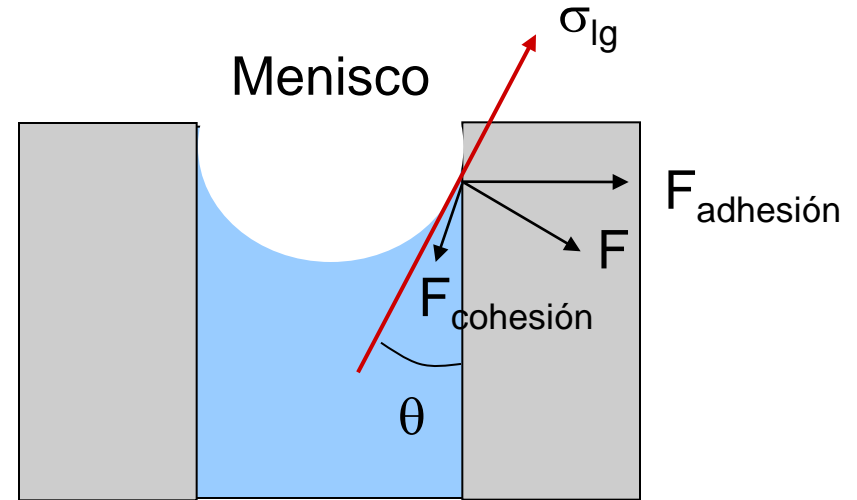
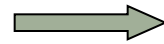


Imagen: Staf Roels. KU Leuven



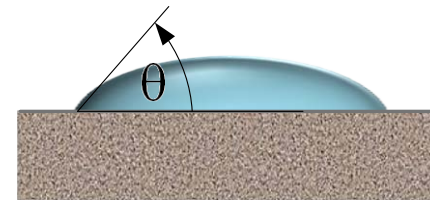
F. adhesión > F. cohesión



$\theta < 90^\circ$ Hidrófilo, "moja" al sólido

Agua-vidrio → $\theta = 0^\circ$

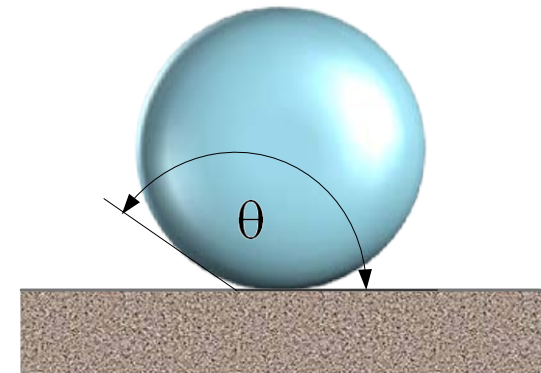
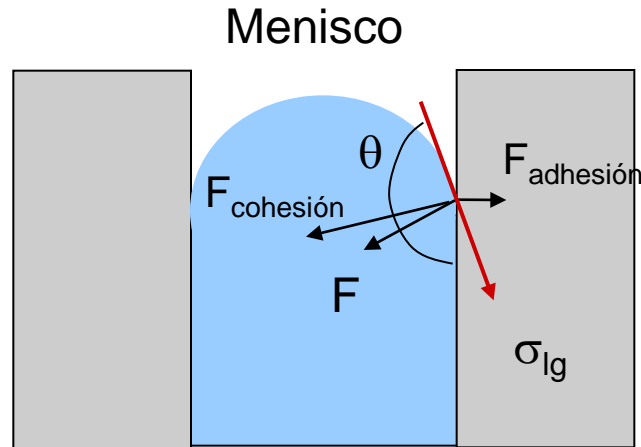
$\sigma_{\text{agua}} = 0'07258 \text{ N/m}$





Interfaz solido-líquido-gas →

- F. adhesión
- F. cohesión



F. adhesión < F. cohesión



$\theta > 90^\circ$

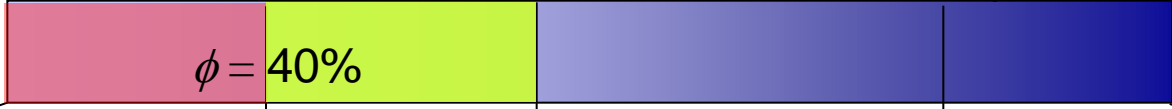
Hidrofobo
“no moja” al sólido

Hg-vidrio → $\theta = 140^\circ$

$\sigma_{Hg} = 0'484 \text{ N/m}$



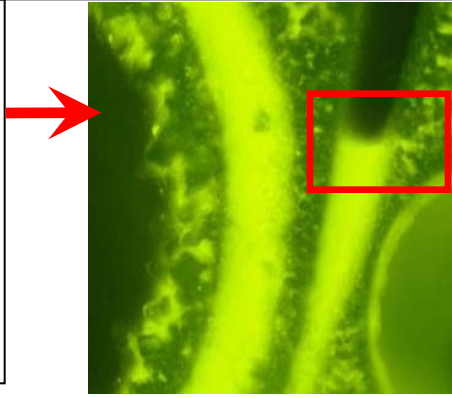
seco W_h W_{cr} W_{cap} W_{sat}



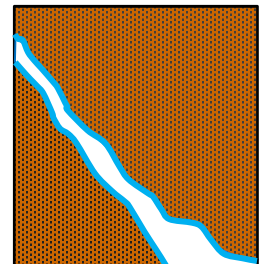
Adsorción molecular

Condensación capilar

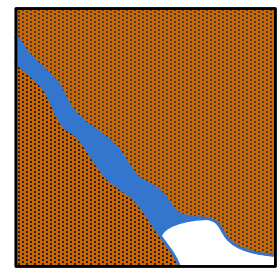
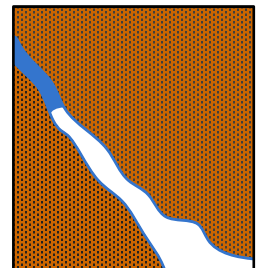
las moléculas de agua se adhieren/desprenden de las paredes de los poros, formándose una capa de moléculas sobre la superficie



al aumentar el espesor de las capas de agua adsorbida en las zonas más estrechas, establecen el contacto formando un **menisco** entre la fase líquida y la fase gaseosa



Adsorción molecular



Condensación capilar



■ Presión capilar

Equilibrio mecánico en la interfaz líquido-gas:

Como consecuencia del menisco formado, se origina una diferencia de presión entre las dos fases $\rightarrow P_{\text{capilar}}$

Geometría de poro cilíndrica

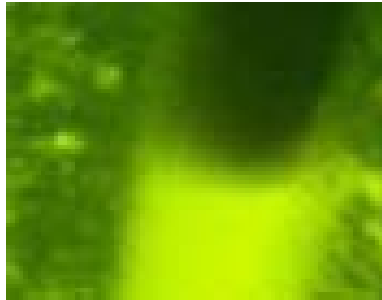
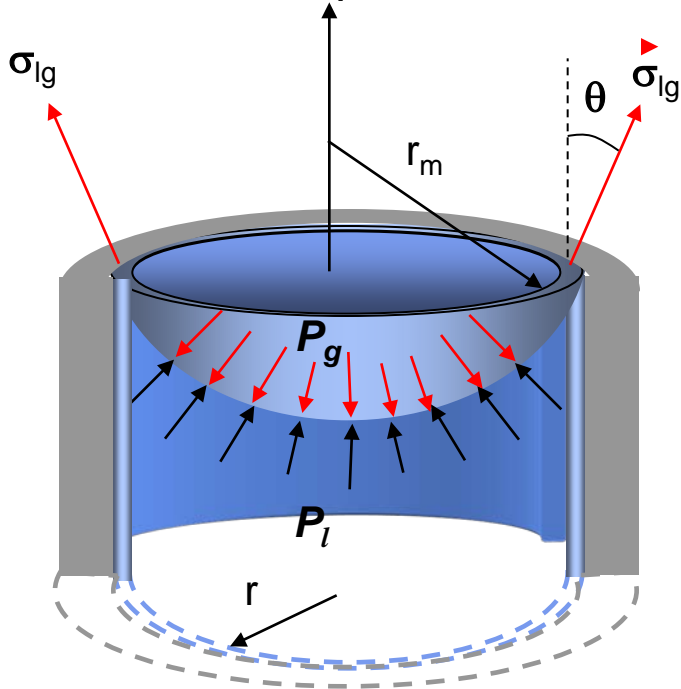
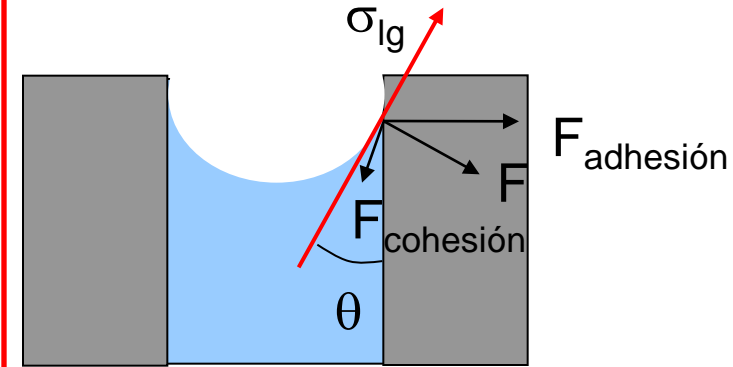


Imagen: Staf Roels. KU Leuven

$$F_{P_y} = (P_g - P_l) \cdot \pi r^2$$

$$F_{\sigma_y} = 2\pi r \cdot \sigma_{l-g} \cos \theta$$



Ec. de Washburn:

$$p_c = P_g - P_l = \frac{2\sigma_{l-g}}{r} \cos(\theta)$$



Relación $\phi - P_c$

Para describir la relación entre ϕ y P_c en los poros:



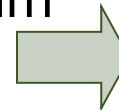
aplicar la condición de equilibrio
termodinámico isotérmico en el menisco
formado



$$\ln \phi = -\frac{p_c}{\rho_l R_v T}$$

ley de Kelvin-Thompson ($\phi - P_c$)

Combinando: la ley de Kelvin
la ecuación de Washburn
y suponiendo para el agua $\cos \theta = 1$



$$\ln(\phi) = -\frac{1}{r} \frac{2\sigma_{l-g}}{\rho_l R_v T}$$

ley de Kelvin-Laplace ($\phi - r$)

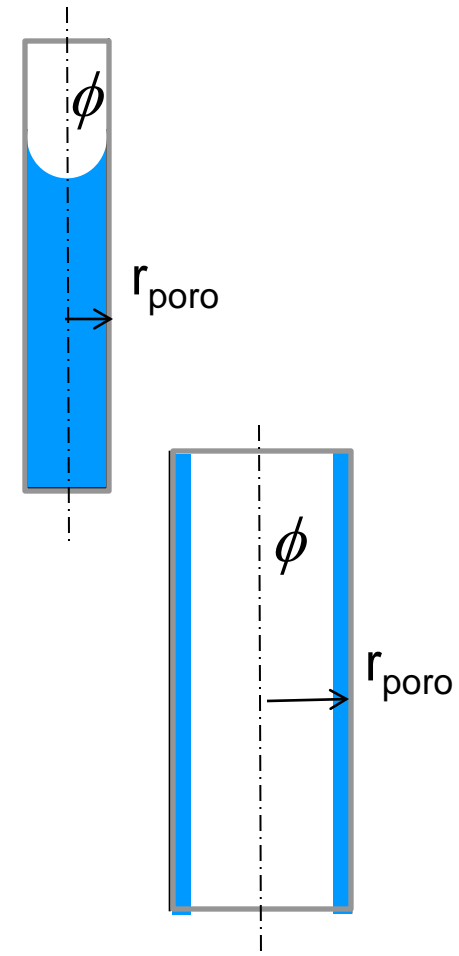
- Relacion: HR \uparrow - P_c \downarrow - r \uparrow



Kelvin-Laplace: determina el tamaño de poro crítico para cada humedad relativa

Para una determinada ϕ :

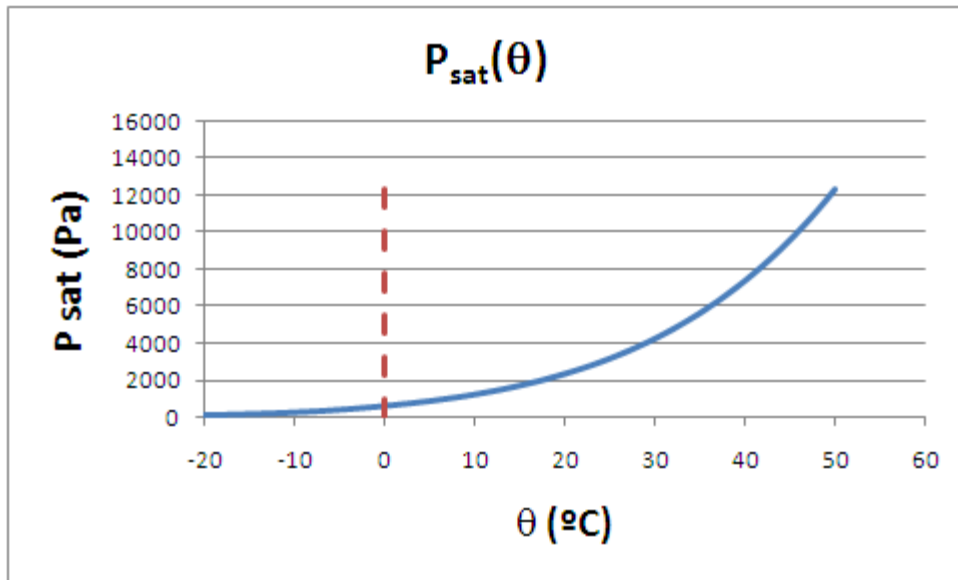
- $r_{\text{poro}} < r \rightarrow$ condensación capilar
(en régimen adsorción)
- $r_{\text{poro}} > r \rightarrow$ se vacía el capilar
(en régimen desorción)





Presión de saturación en superficie libre plana

- Las expresiones de presión de saturación conocidas son válidas para superficies planas



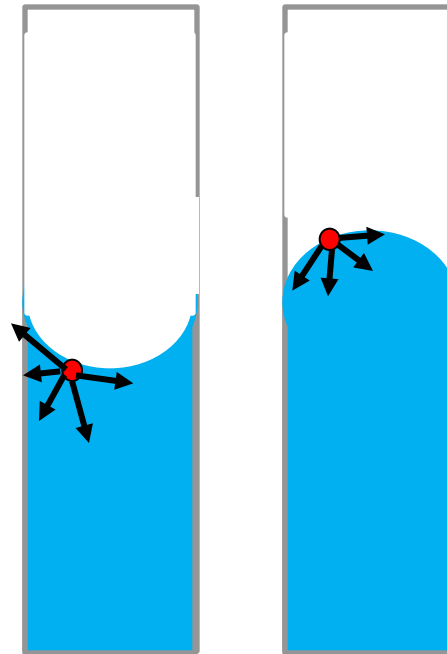
$$P_{sat}(\theta) = 611 \exp\left(\frac{17,08 \cdot \theta}{234,18 + \theta}\right) \quad \theta > 0^\circ C$$

$$P_{sat}(\theta) = 611 \exp\left(\frac{22,44 \cdot \theta}{272,44 + \theta}\right) \quad \theta \leq 0^\circ C$$



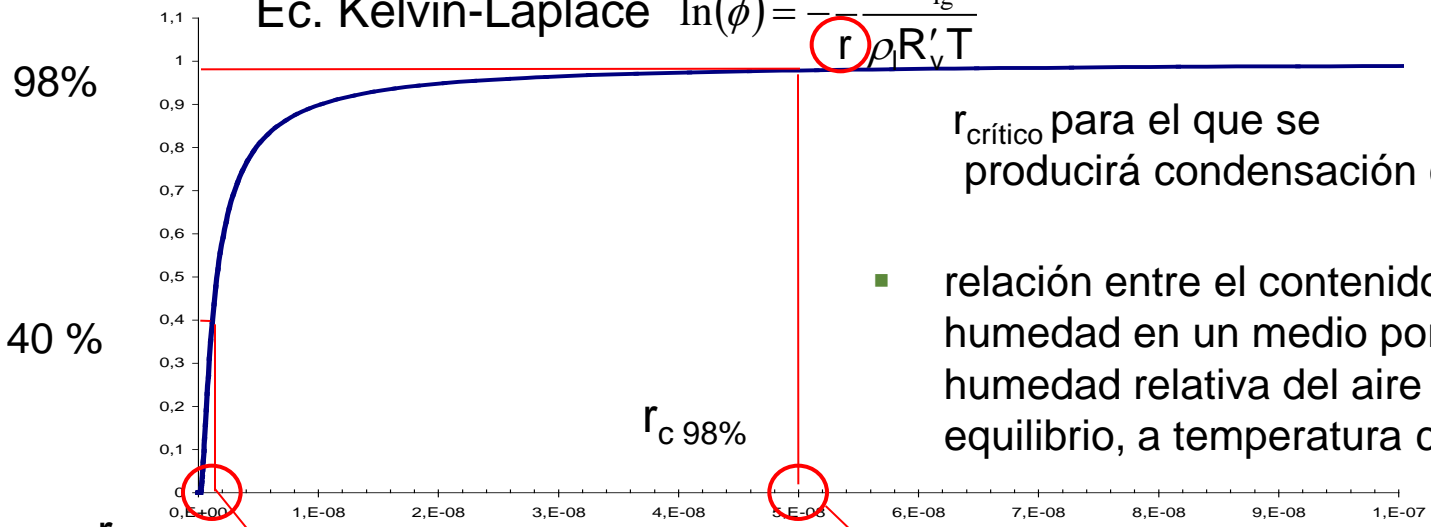
Presión de saturación en los poros

- $r \downarrow \downarrow \rightarrow$ curvatura $\uparrow \uparrow \rightarrow$ moléculas agua se adhieren más fuertemente $\rightarrow P_{\text{sat}} \downarrow \downarrow \rightarrow$ condensación sobre el menisco a partir del 40%.





Ec. Kelvin-Laplace $\ln(\phi) = -\frac{1}{r} \frac{2\sigma_{lg}}{\rho_v R'_v T}$



$r_{\text{crítico}}$ para el que se producirá condensación capilar

- relación entre el contenido de humedad en un medio poroso y la humedad relativa del aire en equilibrio, a temperatura constante.

Isoterma de sorción

w
(kg/m^3)

r_c 40%

50

40

30

20

10

0

0

10

20

30

40

r (m)

50

40

30

20

10

0

0

10

20

30

40

r_c 40%

$r > r_c$ 40%

40 %

98 %

r_c 98%

40 %

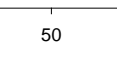
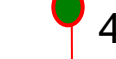
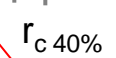
98 %

r_c 98%

40 %

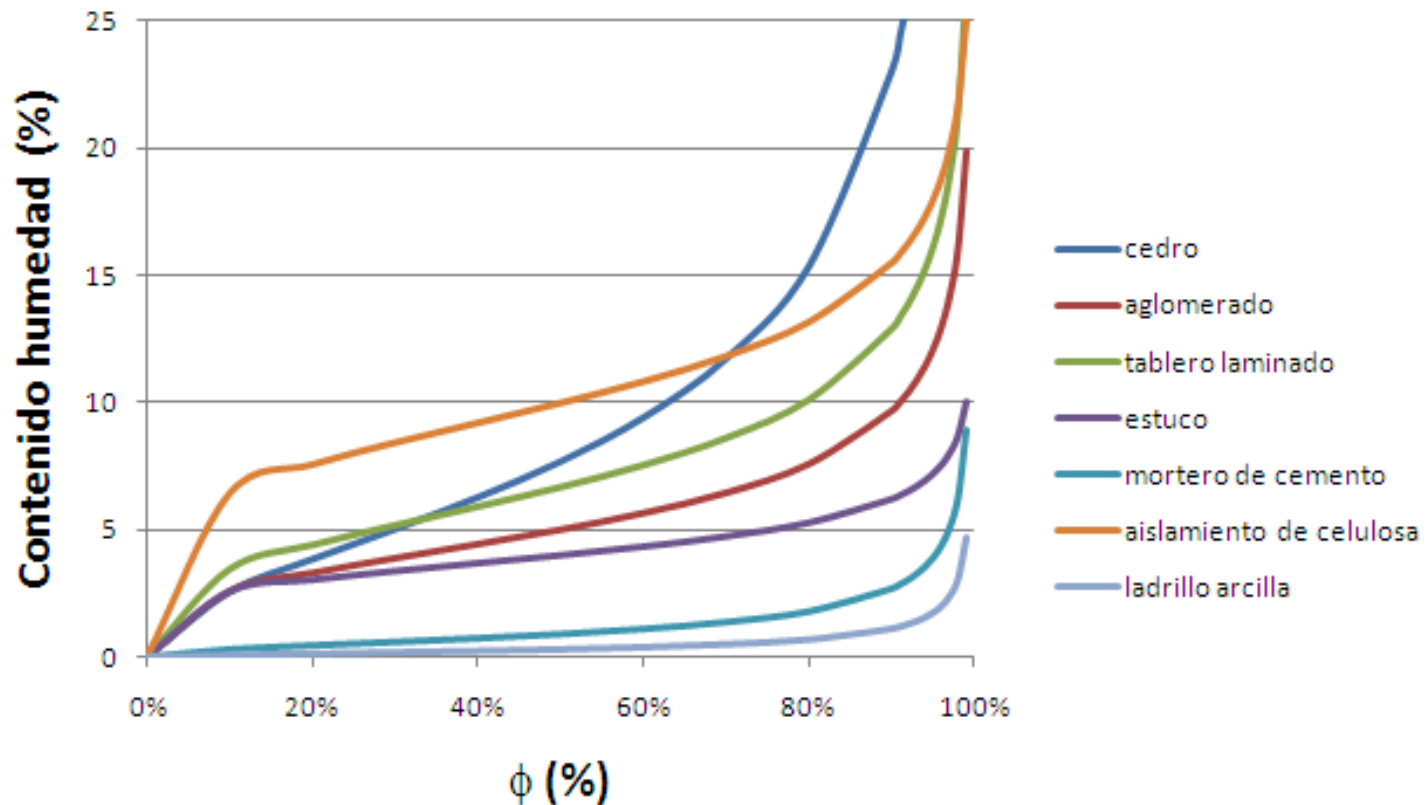
98 %

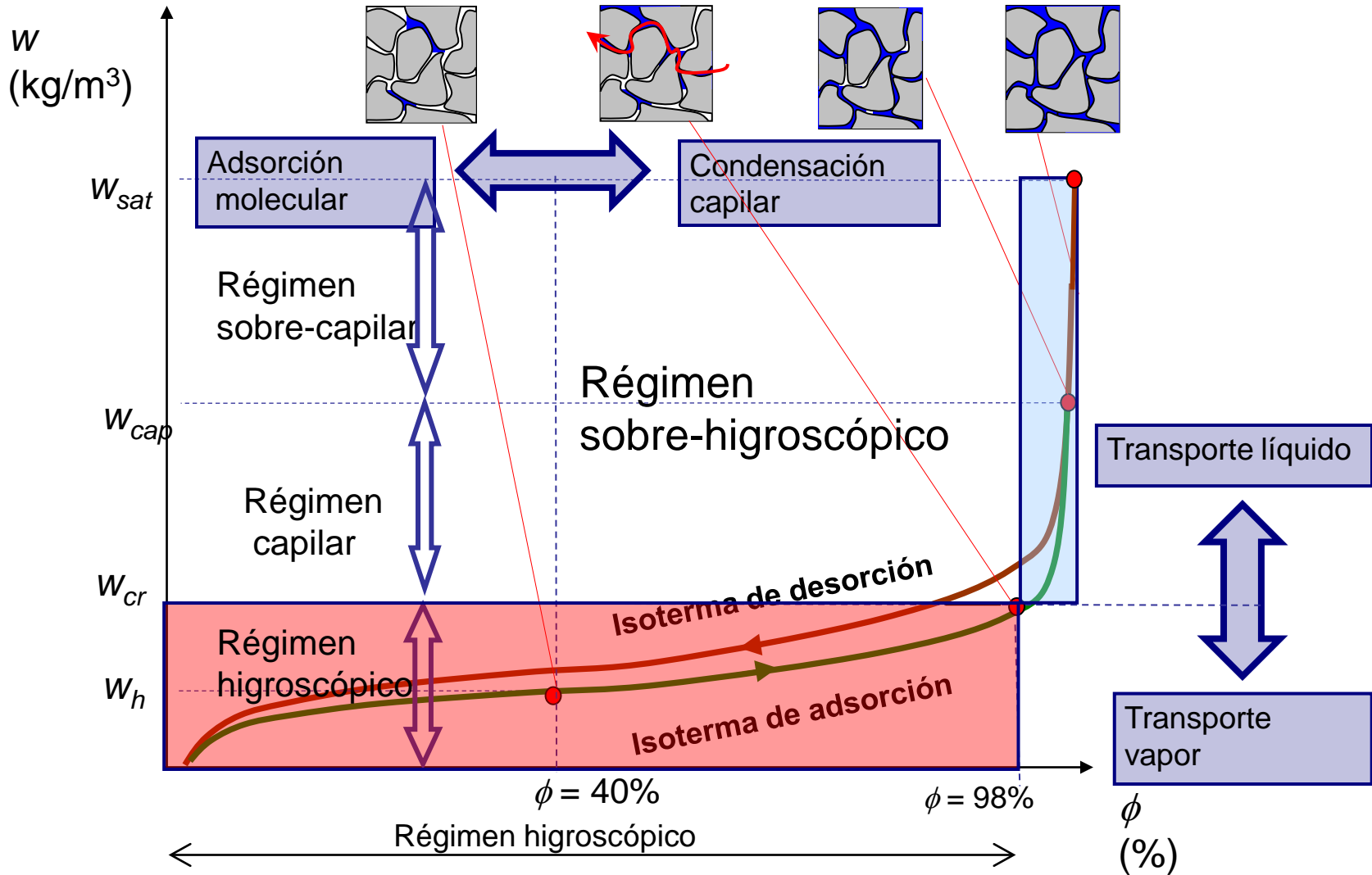
ϕ [%]





Isoterma de sorción



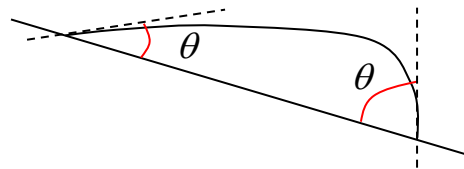




Histéresis adsorción/desorción

Las causas de la histéresis :

- El efecto “cuello de botella”
- El efecto “caída de gota de agua”: diferente ángulo de contacto en la interfaz sólido-liquido para un frente de agua en avance o en retroceso.



- El aire atrapado entre el agua y los poros.



$$w(\phi) \rightarrow w(P_c)$$

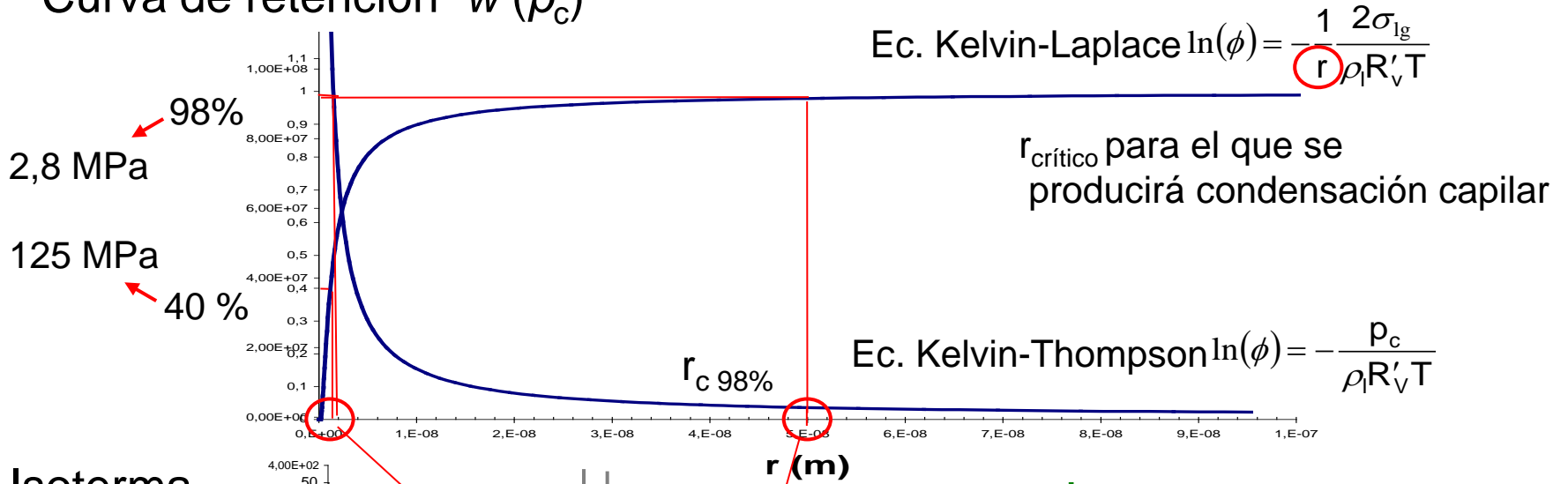
la zona por encima del 95% es poco precisa, debido a:

- fenómenos de histéresis
 - difícil obtener y mantener experimentalmente humedades relativas superiores
- las mediciones presenten grandes dispersiones y alta incertidumbre.

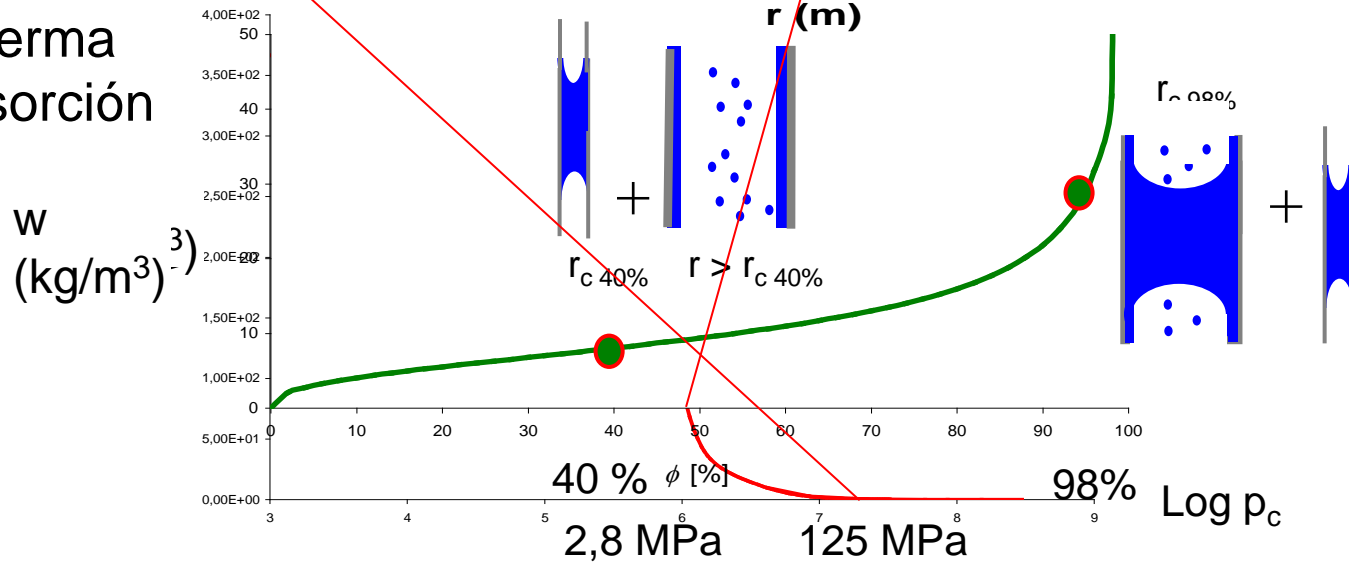
$$w(\phi) \xrightarrow{\text{Kelvin-Thompson}} w(p_c)$$
$$\ln \phi = -\frac{p_c}{\rho_l R_v T}$$



Curva de retención $w(p_c)$

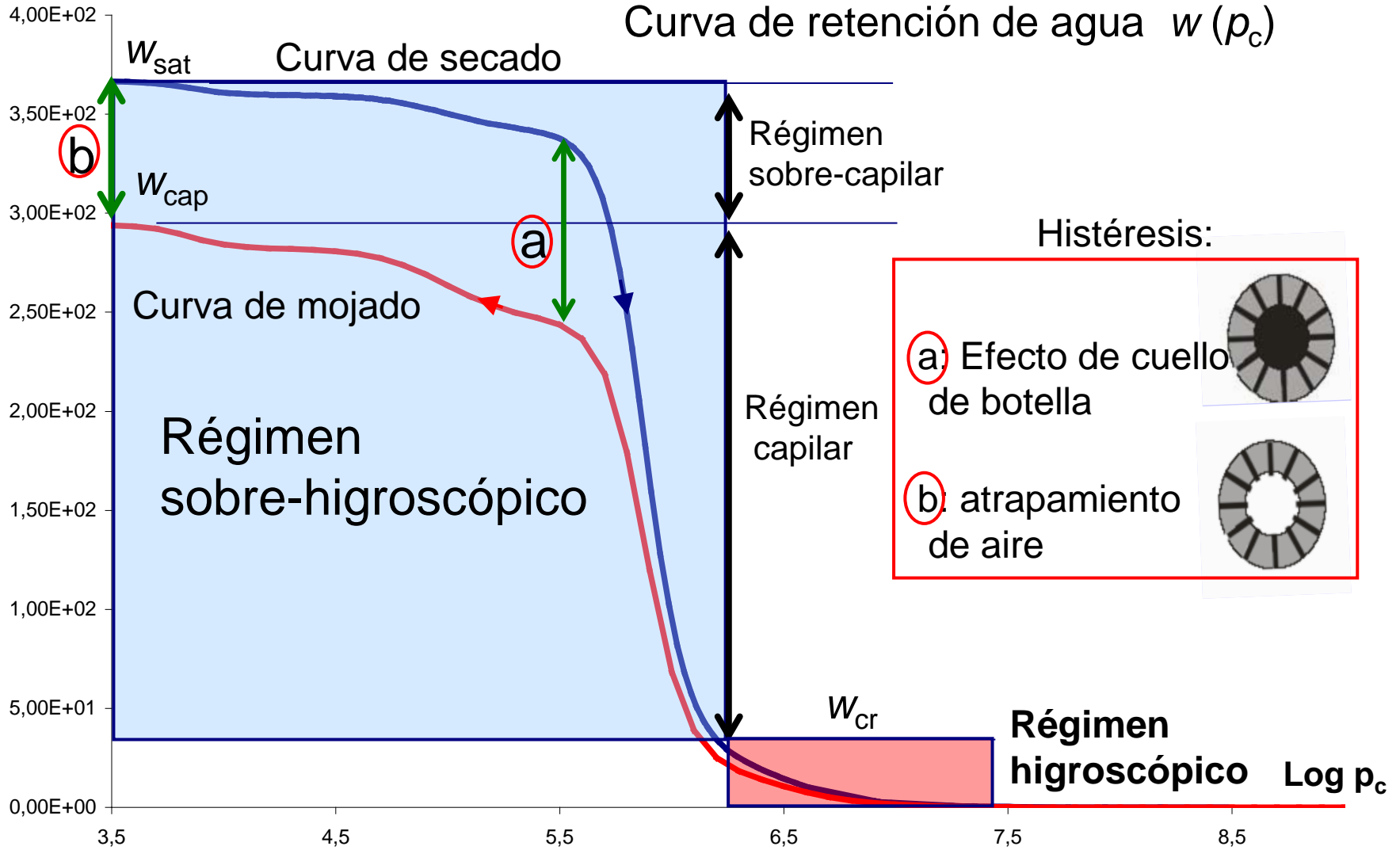


Isoterma de sorción





Curva de retención de agua $w(p_c)$





Mecanismos de transporte de humedad

- El movimiento de la humedad a través de los materiales de construcción porosos, es un fenómeno bifásico complejo, en el que tiene lugar un transporte de agua tanto en forma de **vapor** como de agua **líquida**



Mecanismos de transporte de humedad

Simplificaciones:

- proceso isotérmico
- matriz sólida rígida, macroscópicamente isotrópica, inerte y homogénea
- fluidos: agua y aire húmedo
- aire húmedo = gas ideal (aire seco + vapor de agua)
- agua fluido Newtoniano e incompresible
- agua pura, se desprecia el efecto de sales y otros contaminantes
- efectos gravitacionales despreciables
- no efecto de deslizamiento entre el agua y la matriz sólida
- equilibrio termodinámico entre el agua y el vapor a través del medio poroso
- aire a presión atmosférica a lo largo del medio poroso



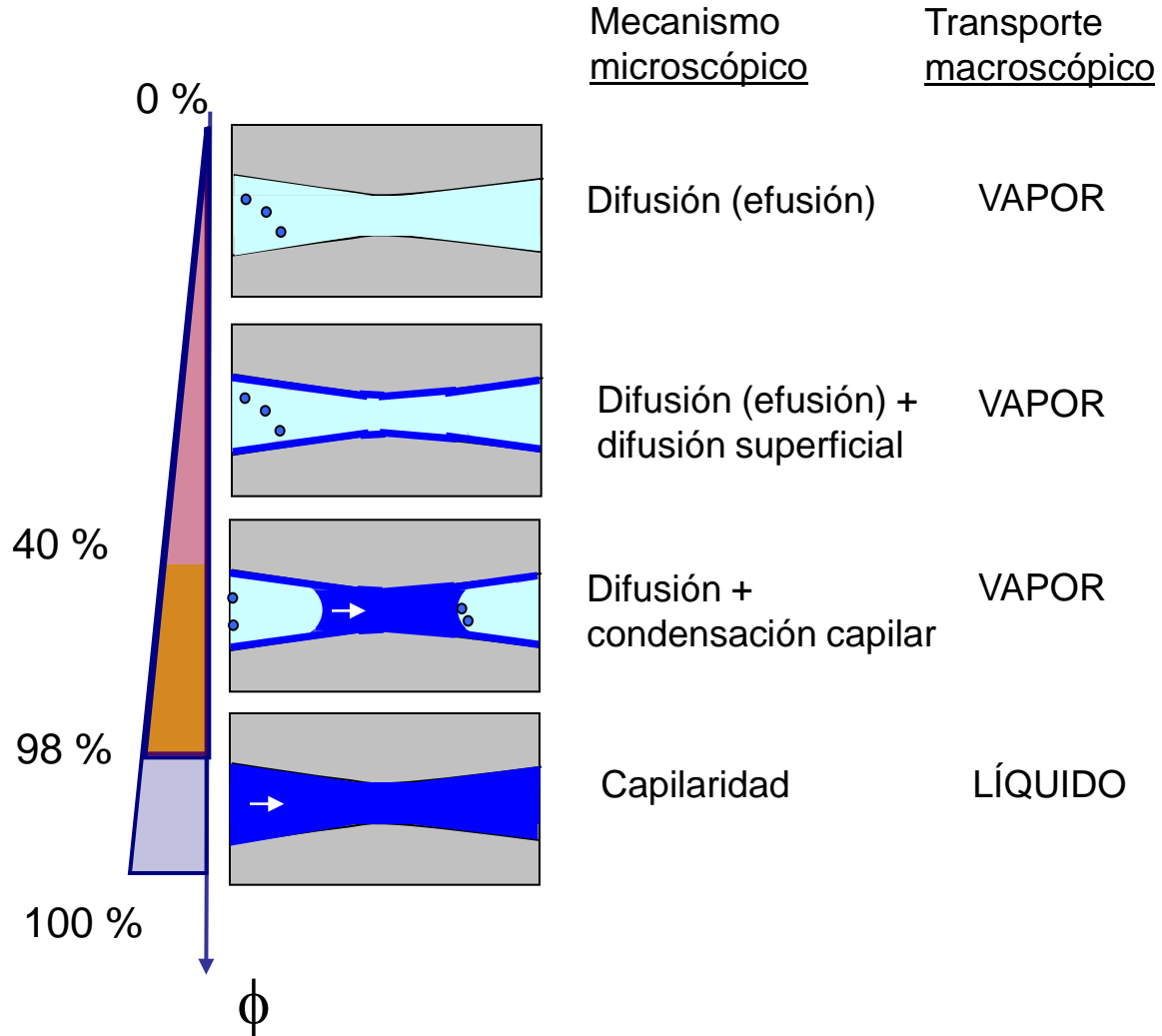
Mecanismos de transporte de humedad

- Hay zonas del rango higroscópico en que predomina un mecanismo de transporte sobre otro:
 - $\phi \downarrow$: sólo difusión
 - $\phi \uparrow$: combinación de difusión y capilaridad
 - $\phi \cong 100\%$: capilaridad dominante.



Mecanismos de transporte

- Difusión de vapor
- Capilaridad
- ~~Termodifusión~~
(proceso isotérmico)
- ~~Convección~~
(aire a P atmosférica)
- ~~Difusión superficial~~
(F.adhesión > F.inercia)
- ~~Gravitacional~~
(efectos gravitacionales despreciables)

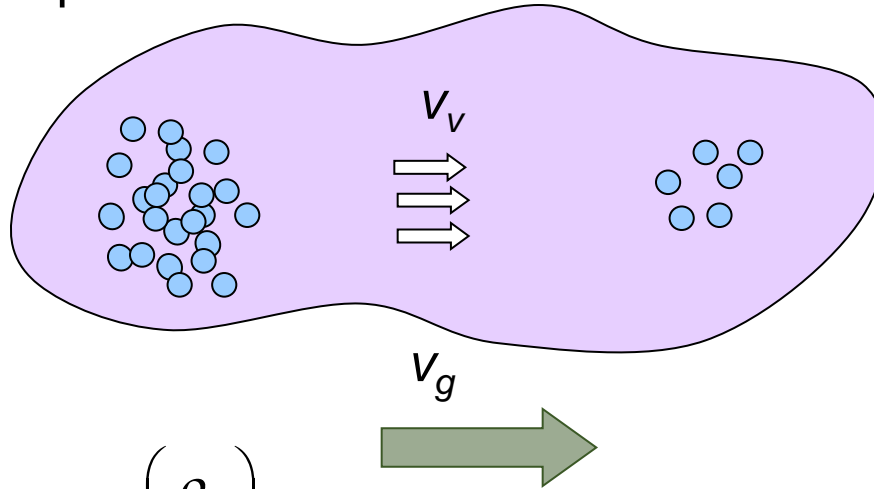




- Difusión de vapor



Difusión de vapor



Fuerza motriz:

$$\nabla \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)$$

Gradiente de concentración en una mezcla de gases

Ecuación de transporte:
ley de Fick

$$\rho_v (\mathbf{v}_v - \mathbf{v}_g) = -\rho_g D_{va} \nabla \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)$$

D_{va} coeficiente de difusión binario de la mezcla vapor-aire seco (m^2/s)

$$D_{va} = 2,31 \cdot 10^{-5} \frac{P_{atm}}{P_g} \left(\frac{T}{273,16} \right)^{1,81} \approx \frac{2,26173}{P_g} \left(\frac{T}{273,16} \right)^{1,81}$$



Difusión de vapor

- Simplificación:

aire a presión atmosférica a lo largo del medio poroso



$$\mathbf{g}_g = \mathbf{v}_g = 0$$

Se anula el término convectivo



$$\psi_o (1 - S_l) \frac{\rho_v}{\rho_g} (\mathbf{v}_v - \mathbf{v}_g) = -D_{va,mat} \nabla \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)$$

$$\psi_o (1 - S_l) \frac{\rho_v}{\rho_g} \mathbf{v}_v = -D_{va,mat} \nabla \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)$$



Difusión de vapor

- Simplificación:

aire a presión atmosférica a lo largo del medio poroso



$$\rho_g = \text{cte}$$



$$\psi_o(1 - S_l)\rho_v \mathbf{v}_v = -D_{va,mat} \cancel{\rho_g} \nabla \left(\frac{\rho_v}{\cancel{\rho_g}} \right)$$

$$\psi_o(1 - S_l)\rho_v \mathbf{v}_v = -D_{va,mat} \nabla \rho_v = -\frac{D_{va,mat}}{R'_v T} \nabla P_v$$



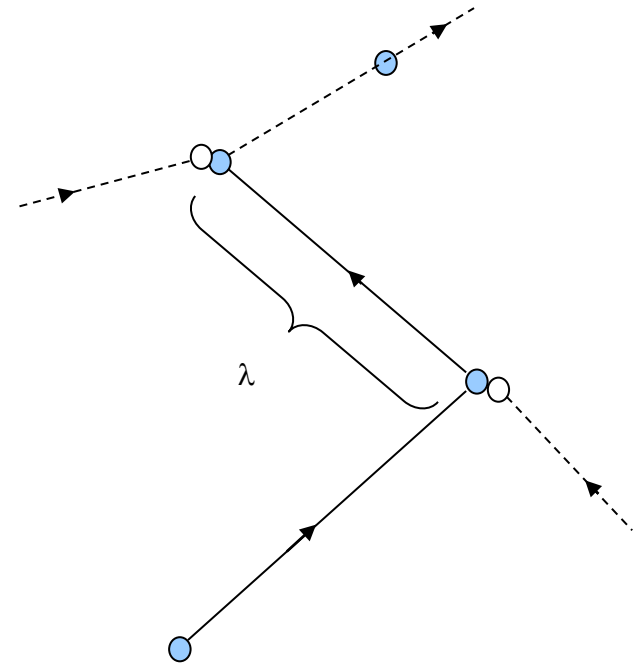
Difusión de vapor

Ley de Fick → válida para difusión pura : cuando el proceso está únicamente gobernado por la interacción entre las moléculas del gas.

Si $r_{\text{poro}} > \lambda$ (*longitud principal de libre recorrido de las moléculas del gas*)

λ depende de:

- tipo de gas
- la temperatura
- la presión

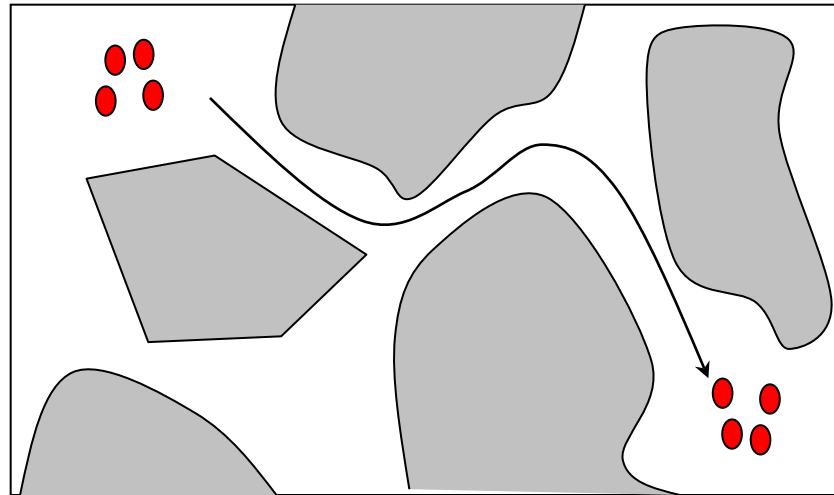


Para el vapor de agua y aire a presión atmosférica y temperatura ambiente → $\lambda = 5 \cdot 10^{-8}$ m.



Difusión de vapor

- Tortuosidad, τ : las moléculas no pueden trazar el recorrido más corto debido a la sinuosa estructura porosa del material.

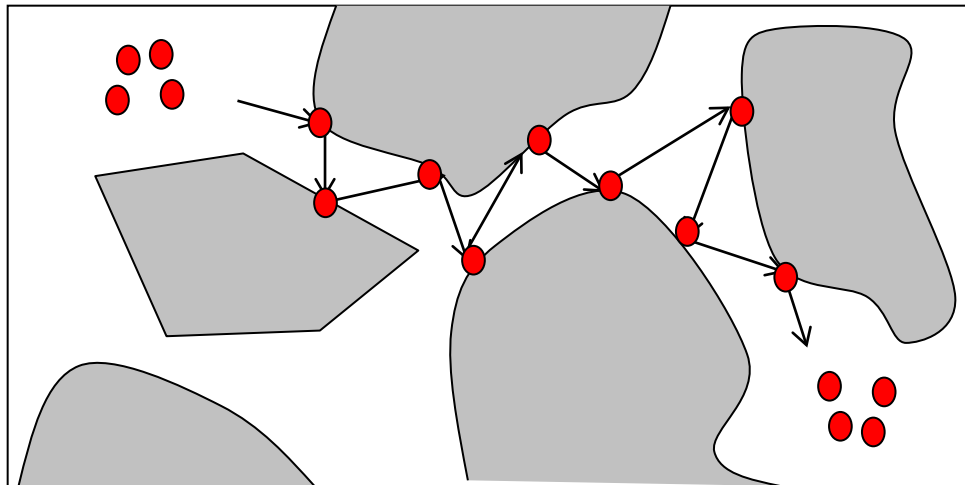




Difusión de vapor

- Efusión: Para poros de radio $r \ll \bar{\lambda}$

interacción entre las moléculas de gas y las paredes del poro es más importante que la interacción entre las propias moléculas de gas.

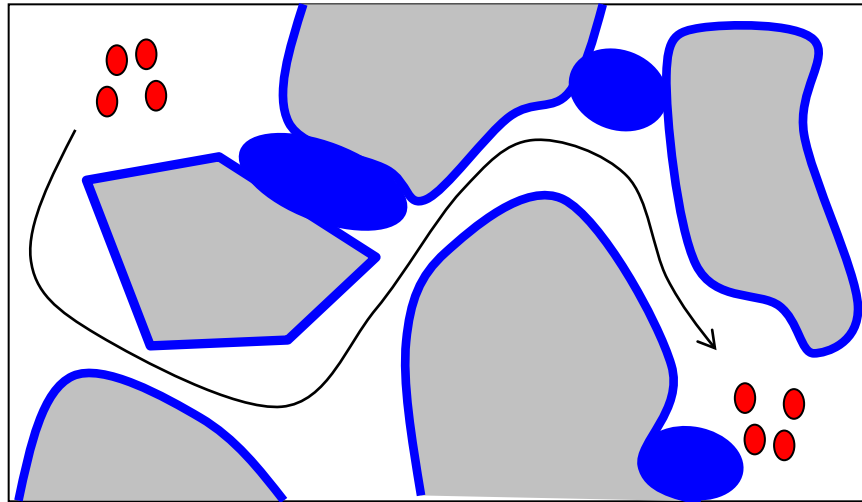


(difusión de Knudsen)



Difusión de vapor

- Grado de saturación



- adsorción molecular → menor sección transversal disponible para la difusión de vapor (se reduce longitud del recorrido libre moléculas)
- condensación capilar → regiones dispersas llenas de agua que reducen el espacio de poro disponible para la difusión.



Difusión de vapor

Fuerza motriz:

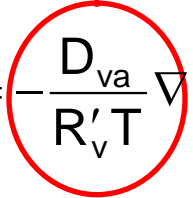
Gradiente de concentración $\nabla \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)$
en una mezcla de gases

Suponiendo:

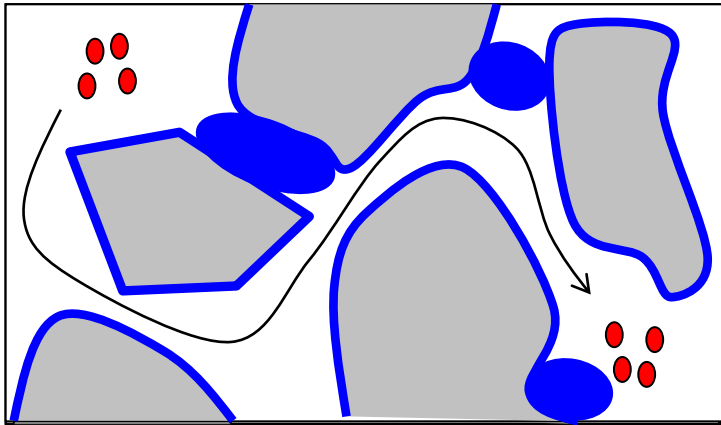
- $P_g = \text{cte}$ ($v_g=0$)
- $\rho_g = \text{cte}$

$$g_v = \rho_v \mathbf{v}_v = -D_{va} \nabla \rho_v = - \frac{D_{va}}{R'_v T} \nabla P_v = -\delta_a \nabla P_v$$

$$\delta_a \left(\frac{kg}{msPa} \right)$$



Medio poroso



Difusión pura

Porosidad: $\delta_v = \delta_a \frac{V_o}{V} = \delta_a \psi_o$

Tortuosidad: $\delta_v = \delta_a \frac{\psi_o}{\tau}$ $\mu = \frac{\psi_o(1-S_l)}{\tau} = \frac{\delta_a}{\delta_v}$

Difusión de Knudsen: $r < \lambda$

Grado de saturación: $\delta_v = \delta_a \frac{\psi_o(1-S_l)}{\tau} = \frac{\delta_a}{\mu}$

Ecuación de transporte: ley de Fick

$$\rho_v (\mathbf{v}_v - \mathbf{v}_g) = -\rho_g D_{va} \nabla \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)$$

D_{va} coeficiente de difusión binario de la mezcla vapor-aire seco (m^2/s)

(Schirmer): $D_{va} = 2,31 \cdot 10^{-5} \frac{P_{atm}}{P_g} \left(\frac{T}{273,16} \right)^{1,81}$



Difusión de vapor

- Ley de Fick para difusión pura:
$$\frac{\rho_v}{\rho_g} (\mathbf{v}_v - \mathbf{v}_g) = -D_{va} \nabla \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)$$
- Ley de Fick modificada para medio poroso (tortuosidad, grado saturación, porosidad):

$$D_{va,mat} = \frac{D_{va}}{\tau} \psi_o f(S_l) \longrightarrow \psi_o (1 - S_l) \frac{\rho_v}{\rho_g} (\mathbf{v}_v - \mathbf{v}_g) = -D_{va,mat} \nabla \left(\frac{\rho_v}{\rho_g} \right)$$



Permeabilidad al vapor de agua, δ_v

$$g_v = - \frac{D_{va,mat}}{R_v T} \nabla P_v \quad (\text{kg/m}^2\text{s})$$

$$\delta_v = \frac{D_{va,mat}}{R_v T} \quad (\text{kg/msPa})$$

Permeabilidad al vapor de agua o coeficiente de difusión de vapor:
cantidad de vapor de agua por **unidad de tiempo** que atraviesa la **unidad de superficie** normal de un material de **espesor unidad**, por unidad de **diferencia de presión de vapor** entre sus caras

$$\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}} = \frac{\text{kg}}{\text{smPa}} = \text{s}$$



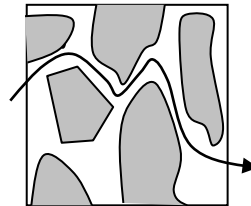
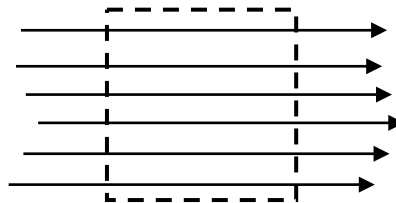
Difusión de vapor

$$\mathbf{g}_v = -\delta_v \nabla P_v \quad (\text{kg/m}^2\text{s})$$



Factor de resistencia al vapor de agua, μ

- dado el bajo valor del parámetro δ_v , se emplea en su lugar el factor de resistencia al vapor de agua, μ .
- es la relación entre la **transferencia de vapor** por difusión en un volumen de **aire** en estancamiento y un volumen idéntico del **medio poroso** bajo las mismas condiciones termodinámicas.





Factor de resistencia al vapor de agua, μ

$$\mu = \frac{g_{v,\text{aire}}}{g_{v,\text{material}}} = \frac{-\frac{D_{va}}{R_v T} \cancel{\nabla P_v}}{-\frac{D_{va,\text{mat}}}{R_v T} \cancel{\nabla P_v}} = \frac{\delta_a}{\delta_v}$$

Por lo tanto, es la relación entre la permeabilidad al vapor del aire en estancamiento y la del medio poroso.

$$\delta_a = \frac{D_{va}}{R_v T} \approx 1,9 \cdot 10^{-10} \frac{\text{kg}}{\text{smPa}}$$



Factor de resistencia al vapor de agua, μ

- μ indica cuantas veces menos permeable al vapor de agua es el medio poroso respecto al aire
- materiales muy permeables: $\mu \approx 1$ (lana mineral)
- materiales intermedios: albañilería, enlucidos: $\mu \approx 10$
- materiales poco permeables: $\mu \approx 100$ (hormigón, aislamientos espuma)
- materiales impermeables, con muy poca porosidad abierta, $\mu > 1.000$ (barreras anti-vapor)



Permeancia, W

Permeabilidad : δ_v [kg/(msP_a)] $\delta_v = -\frac{g_v}{\frac{\partial P_v}{\partial x}}$

material de espesor s $\longrightarrow \delta_v = -\frac{g_v}{\frac{\Delta P_v}{s}}$

Permeancia: $W = \delta_v / s$ [kg/(m²sP_a)]

La permeancia describe una propiedad de una muestra o capa de material de un espesor determinado, no del material constituyente



Permeancia, W

- USA perm : 1 **grano** de vapor de agua que fluye por **hora**, a través de una sección de 1 **pie cuadrado**, inducido por una diferencia de presión de vapor a ambos lados del material de 1 **pulgada de columna de mercurio**.

$$1 \text{ USA perm} = 1.51735 \text{ perm metrico} = 5,745 \cdot 10^{-11} \text{ kg/sm}^2\text{Pa} = 57.2135 \text{ ng/sm}^2\text{Pa}$$

- perm métrico : 1 **gramo** de vapor de agua que fluye por **día**, a través de una sección de 1 **metro cuadrado**, inducido por una diferencia de presión de vapor a ambos lados del material de 1 **mm de columna de mercurio**.

$$1 \text{ metric perm} = 0.659045 \text{ USA perms} \approx 86.8127 \text{ ng/sm}^2\text{Pa}$$



Resistencia al vapor de agua, Z

- La inversa de la permeancia es la resistencia al flujo de vapor, Z_p ($\text{m}^2\text{sP}_a/\text{kg}$).

$$Z_p = 1 / W$$

$$Z_p = s / \delta_v$$



Espesor de capa de aire equivalente, s_d

- s_d : espesor que debería tener una capa de aire tal que

$$Z_{P \text{ capa material}} = Z_{P \text{ aire}}$$

- Es una forma de expresar la resistencia a la difusión de una capa de material de un espesor determinado
 - Cuando espesor del material **no es constante** o difícil de medir
 - Cuando espesor es **muy fino pero la resistencia elevada**



Espesor de capa de aire equivalente, s_d

$$Z_{P \text{ capa material}} = Z_{P \text{ aire}}$$

$$s / \delta_v = s_d / \delta_a$$

$$s_d = s \delta_a / \delta_v = s \mu$$

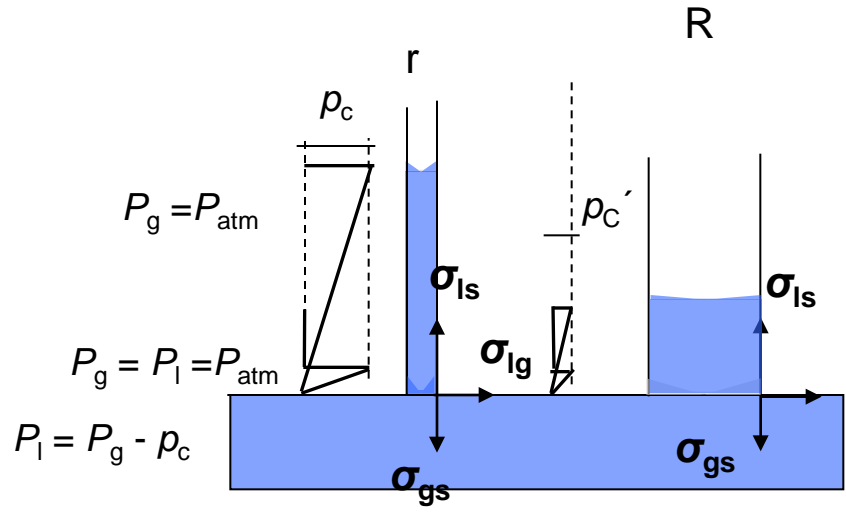
$$s_d = s \mu$$



Transporte capilar



■ Transporte capilar



1. Formación del menisco
2. Creación de $p_c = 2 \sigma_{lg} \cos \theta / r$
3. Formación $\nabla P_l \rightarrow \nabla p_c \rightarrow$ transporte de líquido



Transporte por capilaridad

Fuerza motriz:

Gradiente de presión en el líquido = gradiente de presión capilar

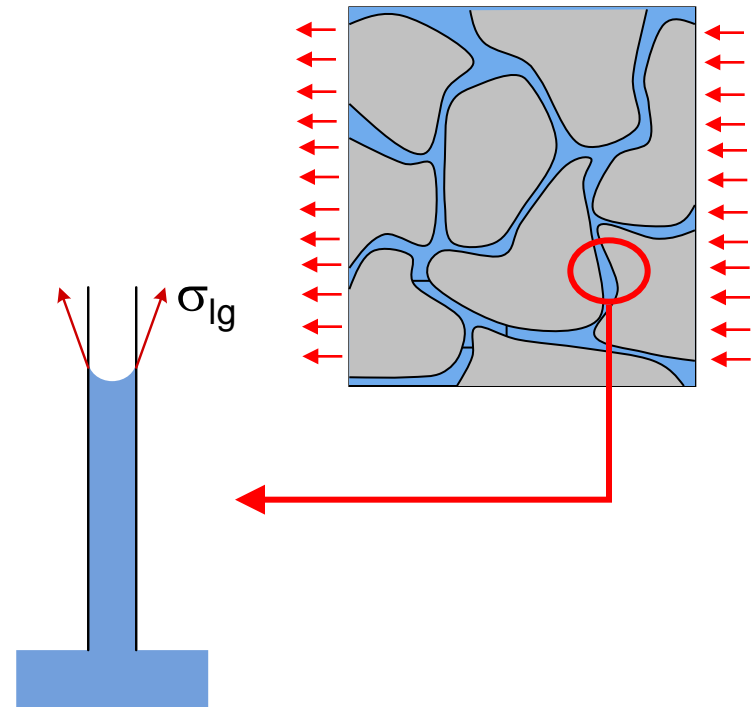
$$P_c = P_g - P_l = \frac{2\sigma_{l-g}}{r} \cos(\theta)$$

$$\nabla P_l = -\nabla P_c$$

Ley de Hagen-Poiseuille
(poro cilíndrico - microscópico)

Ecuación de transporte:

Ley de Darcy
(medio poroso - macroscópico)





Transporte por capilaridad

Ecuación de transporte:

Ley de Darcy

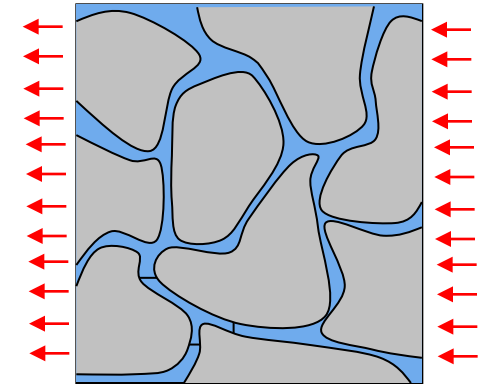
(medio poroso - macroscópico)

El medio poroso

$$\mathbf{g}_l = -\frac{\rho_l}{\eta_l} \mathbf{B} k_{rel,l}(S_l) \nabla P_l$$

El fluido

La fuerza motriz



B tensor de permeabilidad intrínseca del medio poroso (m²)

η_l viscosidad dinámica del agua (Pa·s)

∇P_l gradiente de presión en el líquido (Pa/m)

$k_{rel,l}$ permeabilidad relativa al líquido (-) 0 : 1

$$1 \text{ Darcy} = 9,86923 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$$



Transporte por capilaridad

$$\mathbf{g}_v = -\delta_v \nabla P_v$$

$$\mathbf{g}_l = K_l(p_c) \nabla P_c$$

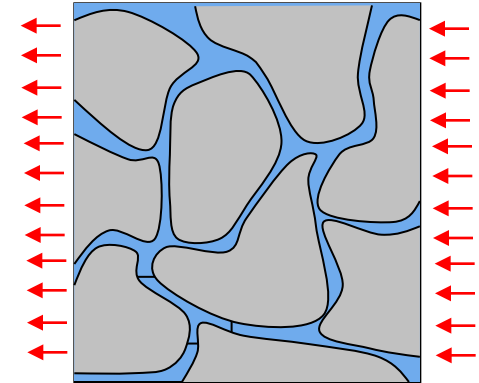
$$\mathbf{g}_l = -\rho_l \frac{\mathbf{B}}{\eta_l} k_{rel,l}(S_l) \nabla P_l$$

$$\mathbf{K}_l = \rho_l \frac{\mathbf{B}}{\eta_l} k_{rel,l}(S_l) \quad \text{Permeabilidad al agua líquida, } K_l \text{ (kg/smPa)}$$

Ecuación de transporte:

Ley de Darcy

(medio poroso - macroscópico)

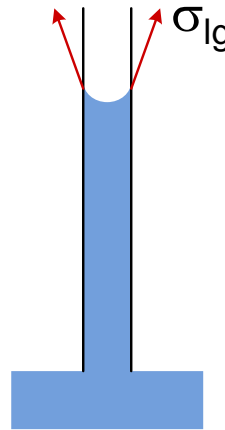




Transporte por capilaridad

Darcy:

$$\mathbf{K}_l = \rho_l \frac{\mathbf{B}}{\eta_l} k_{rel,l} (S_l)$$



Ecuación de transporte:

Ley de Hagen-Poiseuille
(poro cilíndrico - microscópico)

- Se puede simplificar el problema suponiendo flujo laminar y analizando los poros como tubo cilíndricos, y así aplicar la ley de **Hagen -Poiseuille**, para flujo laminar a través de un tubo cilíndrico a velocidades bajas.

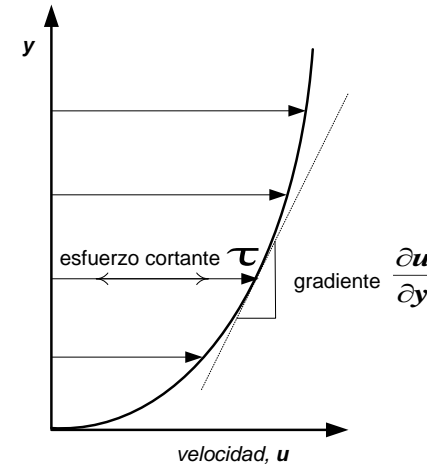
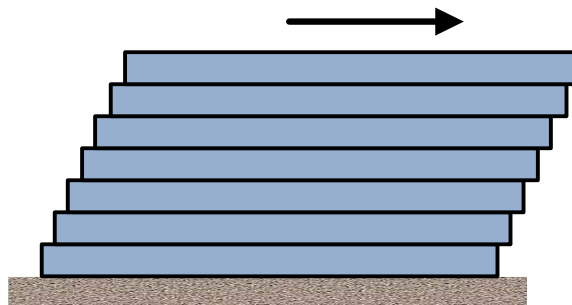
Hipótesis realizadas:

- flujo laminar, fluido viscoso e incompresible
- poro de sección circular constante y significativamente más largo que su diámetro.



Hagen Pousielle

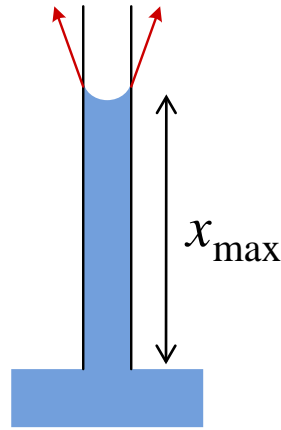
- **Viscosidad**
- **La viscosidad es una medida de la resistencia de un líquido a la deformación por esfuerzo cortante.**
- En general, en cualquier flujo, las capas de fluido se mueven a diferentes velocidades y la viscosidad del fluido se deriva del esfuerzo de corte entre las capas, que se opone a cualquier fuerza aplicada.





Transporte capilar vertical

$$\Delta P_l = \frac{8\eta_l}{r^2} \bar{v} \Delta x$$



$$F_{\text{capilar}} = 2\pi \cdot r \sigma \cos \theta$$

$$F_{\text{fricción}} = \pi \cdot r^2 \Delta P_l = 8\pi \eta_l \cdot x \cdot \bar{v}$$

$$F_{\text{gravedad}} = \pi \cdot r^2 x \cdot \rho_l \cdot g$$

$$\Sigma F = 0$$

$$\bar{v} = \frac{dx}{dt} = \frac{2\pi \cdot r \sigma \cos \theta}{8\pi \cdot \eta_l \cdot x} - \frac{\pi \cdot r^2 x \rho_l \cdot g}{8\pi \cdot \eta_l \cdot x}$$

$$x_{\text{max}} \rightarrow \frac{dx}{dt} = 0 = \frac{2\pi \cdot r \sigma \cos \theta}{8\pi \cdot \eta_l \cdot x} - \frac{\pi \cdot r^2 x \rho_l \cdot g}{8\pi \cdot \eta_l \cdot x}$$

$$x_{\text{max}} = \frac{2\sigma \cos \theta}{r \cdot \rho_l \cdot g}$$

$$x_{\text{max}} \approx \frac{1}{r}$$

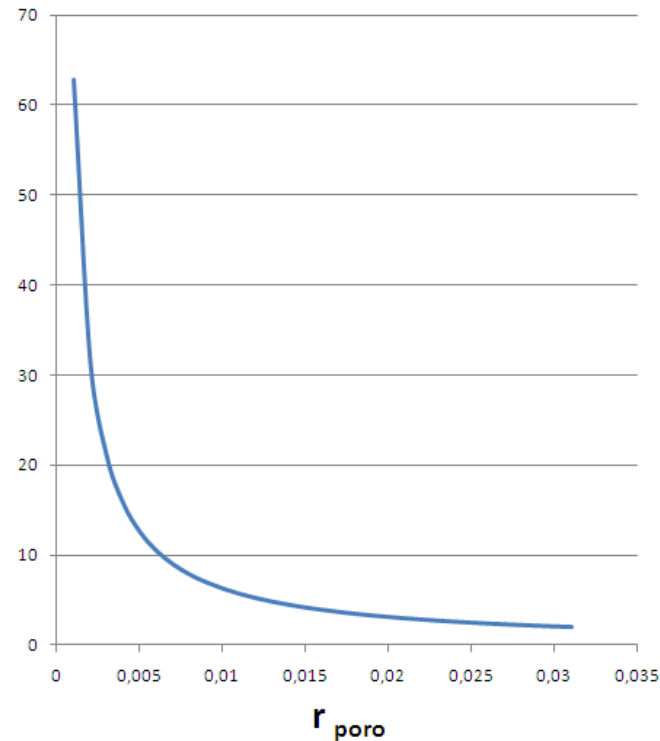
Ley de Jurin



Transporte capilar vertical

$$x_{\max} = \frac{2\sigma \cos \theta}{r \cdot \rho_l \cdot g}$$

x



$$\bar{v} = \frac{dx}{dt} = \frac{2\pi \cdot r \sigma \cos \theta}{8\pi \cdot \eta_l \cdot x} - \frac{\pi \cdot r^2 x \rho_l \cdot g}{8\pi \cdot \eta_l \cdot x} \longrightarrow A \rho_l x = A \cdot A_w \sqrt{t}$$

A_w = coeficiente de absorción capilar ($\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$)



Transporte capilar horizontal

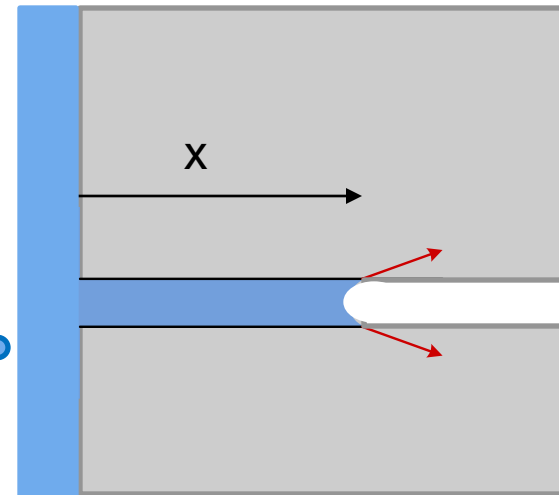
$$\sum F_x = 0$$

No hay componente gravitacional

$$\frac{dx}{dt} = \frac{2 \cdot r \sigma \cos \theta}{8 \cdot \eta_l \cdot x} - \frac{r^2 x \rho_l \cdot g}{8 \eta_l \cdot x}$$

$$x dx = \frac{2 \cdot r \sigma \cos \theta}{8 \cdot \eta_l} dt$$

$$x = \sqrt{\frac{r \sigma \cos \theta}{4 \cdot \eta_l}} \sqrt{t} = B \sqrt{t}$$



B = coeficiente de penetración del agua (m/s^{1/2})



Dispones de un video resumen de recapitulación sobre este tema en el canal de youtube, ver el link en la plataforma eCampus OCW

Muchas
Gracias