

Influencia del medio ambiente en los materiales de construcción

II. La Humedad

JOSE MANUEL FERNANDEZ PARIS, Prof. Numerario de Física, Jefe de la Sección de Química
INTEMAC

La humedad junto con las sales son los factores primordiales que condicionan y deciden la alteración y disgregación de los materiales de construcción de naturaleza pétreo.

Analizar los distintos factores que intervienen en el comportamiento de la humedad que contienen estos materiales es punto menos que imposible, sobre todo si se considera la intrínseca complejidad que supone el sistema capilar de un material.

Se han efectuado numerosos estudios de naturaleza teórica sobre el origen y naturaleza de la humedad, su forma de actuación, distribución en las rocas, así como la acción del hielo y la expansión del agua pura en los sistemas porosos.

Se dispone de numerosos datos experimentales acerca del comportamiento de los materiales en ambientes desérticos y en climas urbanos "húmedos" y "semi-húmedos". No obstante, estas investigaciones y experiencias adolecen de una realización muy limitada, con procesos muy localizados en los sistemas porosos capilares.

Para la fisico-química de los materiales de construcción todo estudio sobre el comportamiento de la humedad y su propagación a través del laberíntico conjunto capilar, ayuda y simplifica el problema de las sales disueltas, puesto que éstas tienen como vehículo el agua e indirectamente a la humedad.

La motilidad de la humedad es la motilidad de las disoluciones salinas.

1. ORIGEN DE LA HUMEDAD

La mayor parte de la humedad presente en los muros de piedra u hormigón de los edificios y monumentos procede del entorno atmosférico que los envuelve, de las lluvias y fenómenos meteorológicos afines y del terreno.

Desde un punto de vista agresivo no puede establecerse una ordenación peyorativa en función de las distintas clases de humedades, que a continuación se van a detallar, sino que es preciso considerar a todas con igual importancia y peligrosidad.

1.1. Humedad procedente de la Atmósfera

Cuando existe un gradiente marcado de temperatura entre un muro y su entorno atmosférico, se depositan en la superficie fría de aquél cantidades considerables de humedad por condensación del vapor de agua, cantidades nada despreciables, como se indicará inmediatamente, aún cuando esta fuente de humedad se ignore con harta frecuencia.

En la fig. II-1 se representa el contenido de agua, expresado en g/m^3 de aire seco y a la presión normal, en función de la temperatura ambiente y de la humedad relativa.

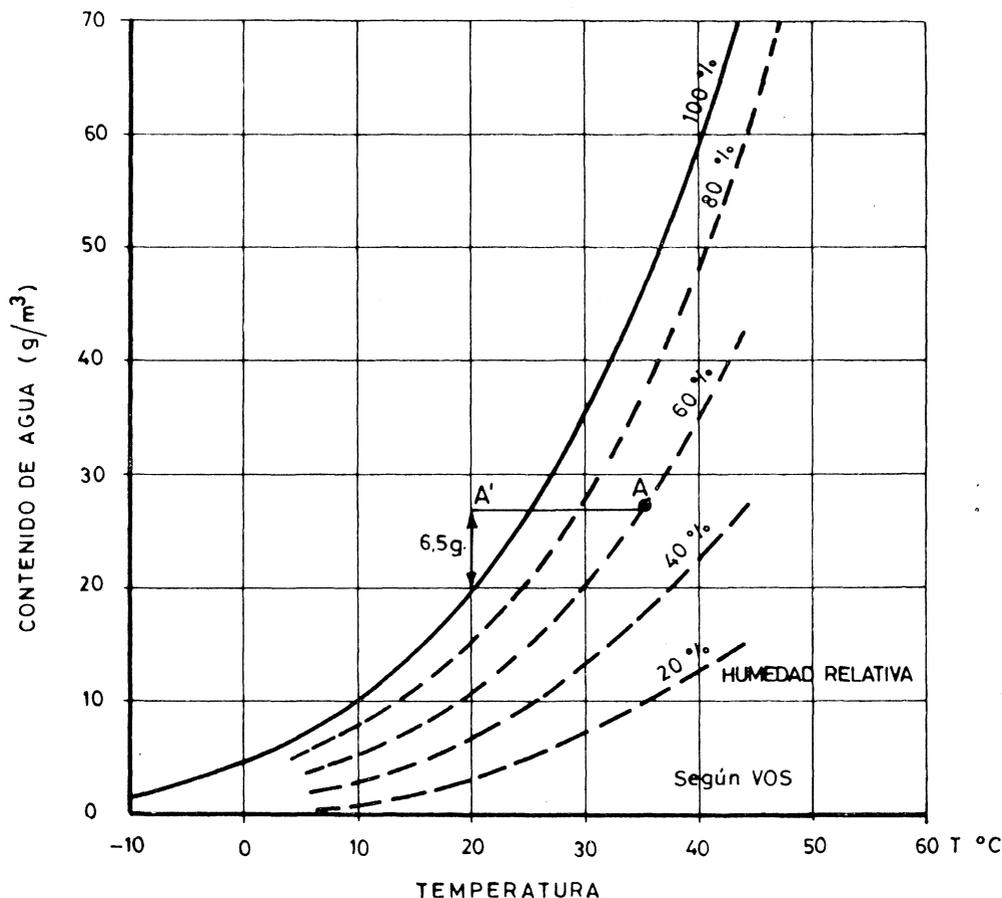


Fig. II-1

Si se supone que el aire de la atmósfera se encuentra a la temperatura de 35 $^{\circ}\text{C}$ y 60 % de humedad relativa, situación del punto A, y se enfría hasta 20 $^{\circ}\text{C}$, punto A', la humedad relativa irá aumentando conforme disminuye la temperatura, y la condensación se iniciará tan pronto como se alcanza el 100 % de humedad relativa, aproximadamente a los 25 $^{\circ}\text{C}$. A 20 $^{\circ}\text{C}$ se habrán condensado 6,5 g de humedad por cada m^3 de aire que haya sufrido el proceso indicado.

En templos y lugares públicos este tipo de humedad es de tener muy en cuenta, como vehículo de sales y otras sustancias perjudiciales a los materiales.

Como dato anecdótico se puede citar el caso de la Basílica de Nuestra Sra. del Pilar de Zaragoza, estudiado por el autor, donde la humedad condensada en los mármoles del interior del templo impregnaba la piedra de materias deletéreas iniciándose de esta manera un proceso de alteración en los paramentos nobles de ciertas naves (1).

Mediante el proceso de condensación expuesto puede, el agua depositada en la superficie de los muros, introducirse en la piedra. Esta acción física está sin duda influida por la difusión de la humedad en el aire, las corrientes y otros factores; pero evidentemente el ejemplo indicado en la fig. II-1, puede darse con toda facilidad en ambientes desérticos e incluso en numerosas ciudades. Su análisis constituye un punto de partida para estudios posteriores.

1.2. Humedad procedente de la Lluvia

Se debe a las lluvias y nieblas localizadas. En un principio se dio demasiada importancia a la acción destructiva que podía realizar este tipo de humedad, pero estudios experimentales recientes han demostrado que el agua de lluvia no se introduce tan fácilmente en los muros de piedra como se creía.

Es preciso considerar que, generalmente, las lluvias y las nieblas actúan de una forma muy intermitente y que tras de un período de humedad excesiva, sucede otro posterior de secado, que elimina la mayor parte de la humedad depositada.

Las superficies construidas con areniscas o materiales pétreos lo suficientemente permeables, y que además estén expuestas con insistencia a este tipo de acción, pueden transmitir la humedad, debida a la lluvia y las nieblas, y favorecer su penetración al interior del edificio.

1.3. Humedad procedente del Suelo

Proviene de los charcos que forma la lluvia, así como de venas freáticas y subálveas.

Esta clase de aguas suele contener una cantidad ponderable de iones, generalmente siempre mayor que las aguas superficiales, debido a que suelen transcurrir de una forma lenta entre partículas de minerales y rocas, todo lo cual favorece el proceso de disolución. No es difícil encontrar aguas subterráneas que hayan alcanzado el grado de saturación de ciertas sales.

El movimiento ascendente de los iones es un proceso continuo. El agua se mueve hacia las aberturas de los canalículos, donde las sales comienzan a cristalizar en la superficie de la piedra, pero cuando por naturaleza la sal es bastante soluble, no sólo cristaliza en la superficie, sino también en el interior de los canalículos citados en zonas muy próximas a la superficie.

Los canalones y bajantes de cañerías, que acostumbran a estar cubiertos por mortero de cemento, suelen ser la causa de manchas oscuras, originadas por condensación externa del vapor de agua sobre esa zona, cuya temperatura, debido al material metálico, suele ser inferior a la del ambiente.

La condensación de la humedad a lo largo de las cañerías puede llegar a ser mayor que la reinante en el interior de la misma.

2. ACCION CAPILAR

La humedad procedente del suelo asciende por efecto de la acción capilar a través de los muros y paredes en las edificaciones, adoptando como trayectorias las que permite la compleja red de poros de los distintos materiales de construcción.

Como fiel compañera de esta humedad, ya que ésta le sirve de vehículo, se encuentran las sales solubles, que lenta, pero inexorablemente, van trepando e impregnando las zonas superiores de los muros y conviene no olvidar que la acción salina es acumulativa.

La altura máxima que puede alcanzar la humedad, debido a la sola acción de la capilaridad, está acusada por la presencia de eflorescencias salinas de aspecto blanquecino o negruzco, dependiendo de su naturaleza.

La presencia de eflorescencias no es un indicio de que en esa zona no haya un grado intenso de humedad, pues en el caso de que los poros capilares sean muy finos las eflorescencias formadas están acompañadas de un exceso de moléculas de agua. Este caso es típico de los muros de albañilería, piedra, hormigón o mortero de cemento.

KIESLINGER (2) ha demostrado que existe una correlación manifiesta entre la altura alcanzada por la humedad y el camino recorrido, según la expresión:

$$h = \frac{2s}{R \cdot d}$$

en la que:

s = constante = 0,074 g/cm,

d = densidad del agua, 1 g/cm³,

R = radio del capilar.

De acuerdo con la expresión anterior, cuando el tamaño granular del material varía entre 0,02 y 0,006 mm, la altura que se puede alcanzar oscila entre 3 y 30 metros.

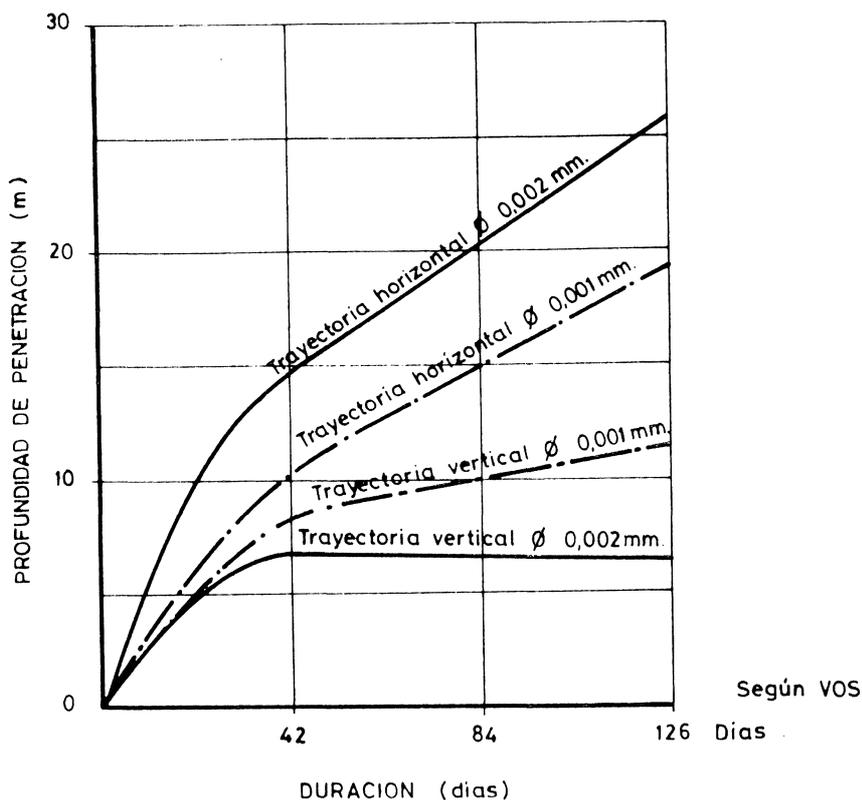


Fig. 11-2

Debe tenerse en cuenta que esta expresión no da valores numéricos reales, sino que establece una mera correlación entre las magnitudes que intervienen.

Los investigadores VOS y TAMES (3), han realizado experimentos, para estudiar el comportamiento de la humedad en los capilares de los materiales de construcción. Los resultados de ambos investigadores se han reflejado en la fig. II-2, y se observa que el camino recorrido en dirección horizontal es superior al vertical. Este resultado en apariencia sorprendente se comprueba en los recorridos reales horizontales de la humedad en los edificios. Desde el punto de vista físico el autor no estima este carácter sorprendente, puesto que el valor de la tensión capilar es independiente de la posición del tubo capilar, y, por consiguiente, cuando el capilar se encuentra en posición horizontal favorece el peso del fluido, mientras que en posición vertical favorece a la fuerza de cohesión entre las moléculas del líquido.

Las experiencias anteriores demuestran que aproximadamente el camino recorrido es doble en sentido horizontal que en vertical, siempre, como es lógico, a igualdad de tiempo.

Los citados estudios de VOS, TAMES y KIESLINGER no se pueden considerar comparativos, puesto que no existe una igualdad en la naturaleza de los materiales empleados en las experiencias, y pueden considerarse como expresiones estocásticas de correlación únicamente, aún cuando establezcan un punto original de partida, para conocer el comportamiento dinámico de la humedad en los sistemas porosos de los materiales de construcción.

En los estudios anteriores no se han tomado en cuenta variables tan importantes como la presión atmosférica, velocidad, dirección y temperatura de los vientos dominantes, así como la radiación solar. También los líquenes y musgos, especies vegetales inferiores, que gustan de fijarse en los paramentos pétreos, confiriendo a las edificaciones una pátina de belleza y autenticidad que han sabido aprovechar las artes plásticas de toda nuestra cultura romántica, mantienen un grado elevado de humedad y obturan en muchos casos las salidas de los poros y capilares, impidiendo de esta forma la evaporación.

Como norma general la distribución de la humedad en altura está íntimamente relacionada con el contenido y distribución de la misma en el suelo.

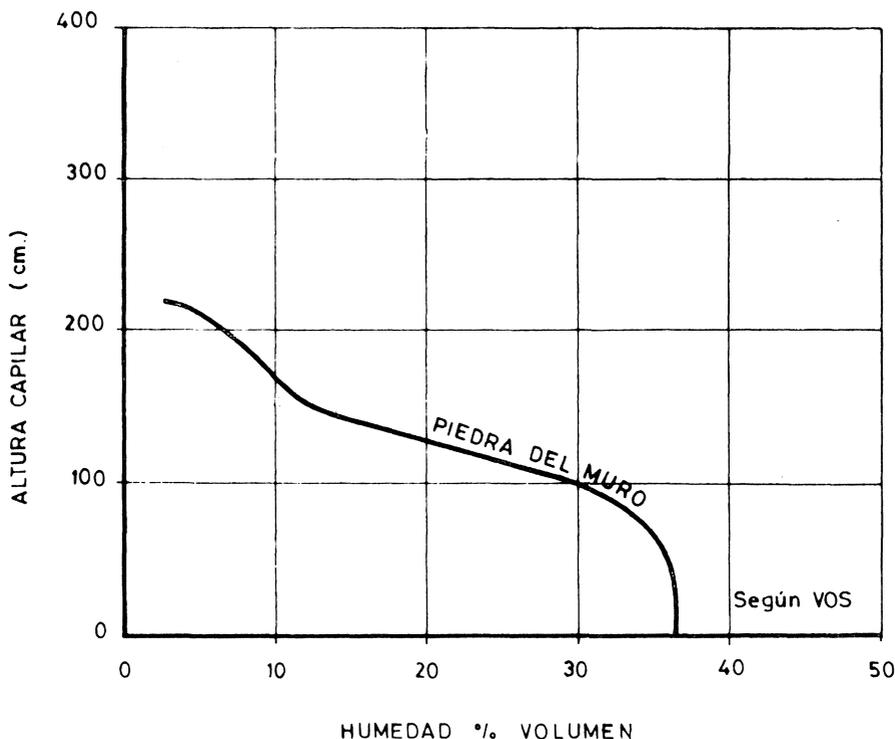


Fig. II-3.—Distribución de humedad. Iglesia de San Sebastián (VENECIA).

En la figura II-3 se puede observar que en un paramento de la Iglesia de San Sebastián de la singular ciudad de Venecia, los contenidos de humedad iban creciendo conforme la altura era menor, respecto al suelo.

2.1. Distribución de la Humedad en los Capilares

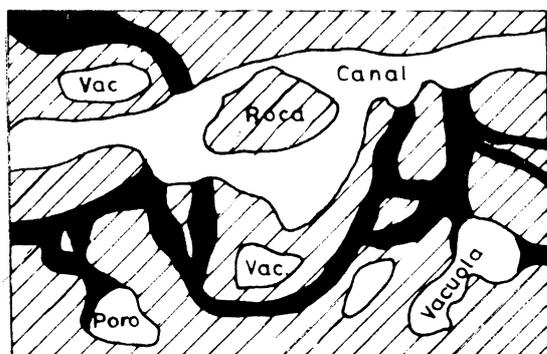
En un conjunto material se denomina “*sistema poroso*” a los espacios ocupados por fluidos, generalmente aeriformes, y pueden considerarse desde el punto de vista físico-químico como una fase del material.

Los *sistemas porosos* pueden considerarse integrados por *canales y poros*. Los *canales* son espacios anisométricos en que su dimensión preferencial es la longitud y en conjunto tienen un aspecto “tubular”. Los *poros* son espacios aproximadamente isométricos.

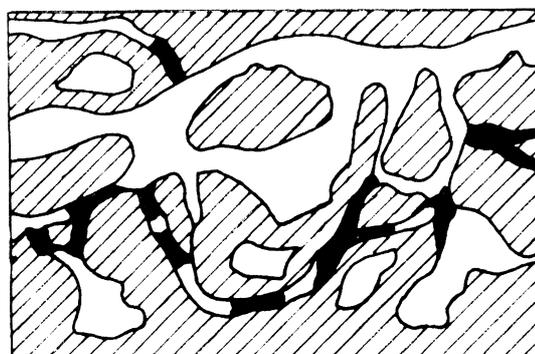
El fluido que ocupa un sistema poroso puede ocuparle por completo o sólo en parte. En este último caso, se producen discontinuidades o interrupciones.

Los *poros y canales*, que no tienen comunicación con el resto del sistema poroso, se denominan *vacuolas*.

La fig. II-4, muestra un esquema que sirve para aclarar los conceptos anteriores.



a



b

Según VOS

Fig. II-4

El agua ocupa los canales capilares únicamente, permitiendo el flujo a través del sistema poroso.

El agua ocupa espacios capilares entre burbujas de vapor, no permitiendo el flujo.

En los sistemas porosos la humedad puede encontrarse en circulación, describiendo una trayectoria determinada, o en estado de equilibrio por condensación en los capilares.

La clasificación anterior se ha efectuado de acuerdo con la forma de sus elementos constituyentes, pero también se podrían clasificar por dimensión radial como *normales y capilares*, pudiendo existir canales normales y capilares, y poros normales y capilares.

El transporte de las disoluciones salinas en los materiales depende de la trayectoria de la humedad.

La trayectoria de la humedad en los sistemas porosos capilares es difícil de observar. Como norma general las areniscas presentan una capilaridad mayor y por tanto un sistema poroso más activo que los materiales carbonatados de origen sedimentario.

Generalmente en un canal capilar horizontal cuyos extremos gozan de la misma presión y temperatura, la humedad condensada en su interior permanecerá estacionaria. Si el canal capilar tiene forma troncocónica, la humedad se desplaza hacia la porción estrecha.

Si en un sistema poroso existen gradientes de temperatura, la humedad emigra a zonas más frías.

Generalmente en los muros de los edificios antiguos la zona interna es la más fría, y por tanto en la mayoría de los monumentos, la humedad se desplaza desde el exterior al interior de la estructura.

La condensación en los capilares de la humedad depende principalmente del estado higrométrico del aire que está en contacto con el material de construcción. A una humedad relativa del 98 % puede considerarse que todo el sistema poroso capilar se encuentra ocupado por humedad, si bien a un 40 % de humedad relativa existe un contenido de humedad condensada, conforme puede comprobarse en la fig. II-5 obtenida de los ensayos efectuados con un hormigón, que puede equipararse a una arenisca.

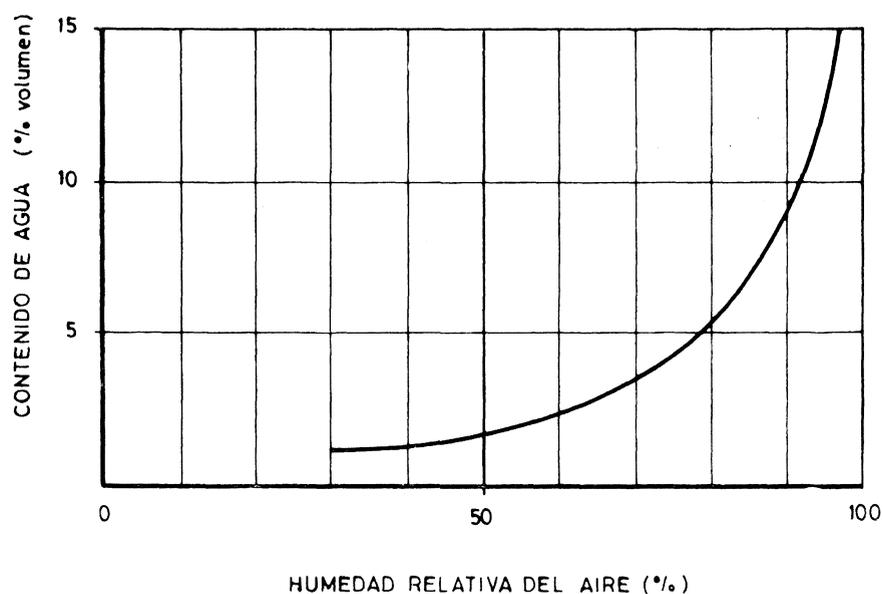


Fig. II-5

Las experiencias efectuadas por VOS y TAMES (4), con ladrillos porosos, expuestos a la acción de diferentes humedades y que previamente habían saturado con diversos contenidos de cloruro sódico, demostraron que las sales solubles embebidas en la piedra aumentan la humedad higroscópica en bastantes veces la propia del material.

Como norma general las sales solubles, contenidas en los bloques de piedra, emigran hacia las caras exteriores, encontrándose en los 5 cm primeros los contenidos más elevados.

Existe otro tipo de agua, denominada "agua polarizada", adherida fuertemente a la roca en la interfase roca/agua, orientada por polaridad, debido a la acción de fuerzas electrostáticas. Este tipo de agua, según RUIZ (5), está inmovilizada y desde el punto de vista mecánico, sus propiedades se asemejan a las de un sólido rígido. Se ha comprobado que para una humedad relativa del 50 % el espesor de esta película viene a ser de 2 a 3 micras. Parece comprobado que esta clase de agua interviene en la acción peyorativa de los ciclos de humectación y secado, así como numerosos fenómenos osmóticos característicos de los ciclos de alteración, pero no debe caerse en el error, como ha sucedido, de atribuir el comportamiento anómalo a la presencia de esta clase de agua polarizada.

2.2. Trayectoria de la Humedad

Hay que adoptar que el agua nunca trepa o asciende por la superficie externa de los muros, sino que se desplaza por el interior del material.

No obstante, conforme ha observado KAISER el transporte salino tiene lugar desde el interior hacia la superficie de las piedras, provocando un ablandamiento y desmoronamiento, que es la causa de su pérdida de resistencia.

Las sales solubles tienden a dirigirse hacia afuera, las más solubles, como los cloruros y sulfatos alcalinos, permanecen en disolución, desplazándose hacia el exterior o interior, según el grado de humedad.

Las sales menos solubles, yeso, sulfato cálcico y carbonato cálcico, cristalizan en las zonas más próximas de la superficie. Observándose el hecho notable de que *la cristalización es mayor en áreas expuestas a la luz que en las oscuras.*

En numerosas ocasiones se perciben demarcaciones coloreadas sobre los tonos de fondo del material: se deben a un secado rápido e intenso. Si las demarcaciones son casi negras o muy oscuras, se deben a la imposibilidad de la humedad para evadirse del sistema poroso interior. Las citadas demarcaciones suelen estar constituidas por aglomerados de bacterias, algas y líquenes, con capacidad suficiente para obstruir los terminales de los capilares, evitando así un secado profundo.

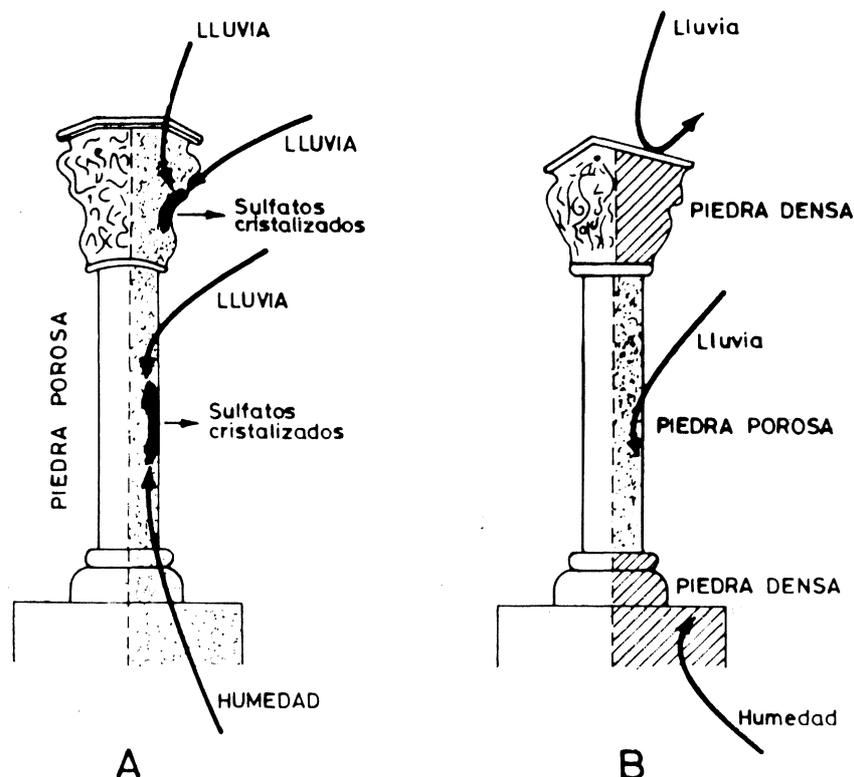


Fig. II-6.—Formación de sales disruptivas por heterogeneidad.

Los daños de la humedad podrán evitarse o por lo menos atenuarse empleando materiales más densos en las zonas altas y bajas del edificio, actuando como auténticas barreras de la humedad contra la existente en el suelo como la procedente de la lluvia.

En la fig. II-6 se han dispuesto dos columnas, que bien pudieran ser un pórtico o claustro. La columna A dispone de un basamento, un fuste y un capitel, ejecutados con una piedra porosa. En el supuesto de que la sustancia agresiva fuesen sulfatos solubles, el agua de lluvia y la humedad procedente del suelo, penetrarían fácilmente por el interior de la columna, deteriorando los capiteles y los fustes por formación de eflorescencias disruptivas de sulfatos insolubles.

En la columna B el capitel y basamento se han elaborado con un material pétreo más denso y compacto, que dificulta el fácil acceso de ambas unidades.

2.3. Acción disruptiva del Agua pura

La acción expansiva en el interior de los materiales se debe, no sólo a la cristalización de las sales en disolución, sino también al efecto disruptivo del agua pura, absorbida y polarizada, del sistema poroso.

El agua ordinaria es capaz de expansionar lo suficiente como para romper piedras de baja resistencia expuestas a calentamiento.

La fig. II-7, representa una gráfica debida a DORSEY y relaciona el cambio de volumen y las temperaturas. Cada línea une los puntos de igual cambio de volumen a 1 atm, 100, 200, etc.

A título de ejemplo, se ha representado la expansión volumétrica media del granito, mediante la recta ligeramente inclinada, conociendo el dato de que el granito expande 0,15 % a 60°C.

A esa misma temperatura el agua expande a 1 atm, o sea, sin comprimir un 1,5 %. Si las paredes de los poros impiden que se dilate el 1,5 %, el agua ejercerá una presión de 380 atm contra las paredes del granito.

Los minerales leucocratos, tales como el cuarzo y los feldespatos, parecen estar poco afectados por las temperaturas superficiales, mientras que los minerales melanocratos, como piroxenos y anfíboles pueden sufrir esfuerzos perjudiciales. Cuando se alcanzan tensiones a compresión de 1.750 kp/cm² y 530 kp/cm² los materiales comienzan a trabajar bajo esfuerzos perjudiciales.

Por simples ciclos de “empapado-secado” a temperatura constante, una roca experimenta acciones expansivas. Los investigadores HOCKMAN y KESSLER han comprobado que los granitos expanden un 0,0005 %, los mármoles un 0,002 % y las areniscas un 0,03 % y que algunos materiales por acción de un empapado o secado rápido pueden llegar a romperse.

La acción calorífica de los rayos solares, es decir, la insolación, entendiéndose como tal “la cantidad de energía solar por unidad de superficie horizontal”, juega un papel de suma importancia en la alteración y destrucción de los materiales pétreos.

Antiguamente los exploradores del desierto asociaban las explosiones y sonidos de las piedras con fuerzas mágicas y poderes ocultos. Los más científicos veían su origen en expansiones y contracciones diferenciales de los distintos minerales, que componían la roca por efecto de las elevadas temperaturas.

Los estudios de GRIGGS (6), han desvelado el supuesto misterio y la causa residía en la humedad capilar. Al exponer las rocas a ciclos de calentamiento y enfriamiento de 70°C a 0°C observó y comprobó que al cabo de 89.400 ciclos adquirirían el aspecto de una roca de

250 años. El mayor cambio lo observó en un granito húmedo después de 10 días de experimentación, que corresponde a 2 años y medio de exposición en un ambiente real del desierto. Al cabo de este tiempo la alteración y el daño eran evidentes. Estos experimentos demuestran que el agua pura tiene el mismo efecto destructivo en el desierto que en las construcciones urbanas.

B I B L I O G R A F I A

- (1) J. M. FERNANDEZ PARIS: Materiales de Construcción. Inst. E. Torroja. 1974, 31-50.
- (2) KIESLINGER: Zement und Beton., 1957, 1-7.
- (3) B. H. VOS y E. TAMES: Rept. N.º B-1 68-38. Inst. TNO for Building Materials and Building Structures. Delf. Holanda. 1968.
- (4) B. H. VOS y E. TAMES: Rept. N.º B-1 69-96. Inst. TNO for Building Materials and Building Structures. Delf. Holanda. 1969.
- (5) C. L. RUIZ: Highway Research Board Bulletin 313, pg. 47.
- (6) D. T. GRIGGS: Journal of Geology, 44, 1936.