

4. FACTORES DE DETERIORO DE LOS MATERIALES POROSOS INORGÁNICOS

A. Elena Charola

Introducción

Se consideran materiales porosos inorgánicos a la piedra, los morteros de juntas o revoques, las cerámicas y el adobe. La diferencia de comportamiento entre ellos depende de la naturaleza del material, su textura y su porosidad. Así, por ejemplo, las areniscas de las Misiones (triásicas de la formación Misiones o Botu-Catú, o cretáceas de la formación Serra Geral, para el caso de la Misión de São Miguel) pueden ser un cuarcito si están bien cementadas, o pueden ser del tipo laja, conteniendo mayor o menor cantidad de arcillas. Los morteros pueden estar formulados a base de cal o de cemento Portland. Estos últimos pueden haber sido introducidos en las intervenciones sufridas a lo largo de los años. Estas variaciones de composición resultan también en variaciones de textura y porosidad, por lo que la respuesta de cada material será distinta frente a un mismo factor de deterioro. Como la piedra es el material actualmente más frecuente en las estructuras de las misiones, se toma como ejemplo para explicar los fenómenos de deterioro.

Los factores de deterioro de los materiales pétreos son varios y pueden subdividirse, en una primera instancia, entre aquellos que afectan al material físicamente y los que lo afectan químicamente. Pero esta subdivisión, como se verá, es sólo aproximativa, pues muchas veces los efectos pueden estar combinados.

Las cargas que soporta una estructura, si no están bien distribuidas, pueden resultar en fracturas y aún roturas de elementos. De forma similar, las vibraciones que pudieran afectar a la estructura pueden generar, si son suficientemente grandes (por ejemplo, en caso de un terremoto), la desestabilización de la estructura con los consecuentes efectos mecánicos. Estos efectos también pueden resultar del crecimiento de raíces, sobre todo de arbustos y árboles mayores, como ocurre en las Misiones Jesuíticas de los Guaraníes.

4. FATORES DE DETERIORAÇÃO DOS MATERIAIS POROSOS INORGÂNICOS

A. Elena Charola

Introdução

São considerados materiais porosos inorgânicos a pedra, as argamassas de juntas ou rebocos, as cerâmicas e o adobe. A diferença de comportamento entre eles depende da natureza do material, de sua textura e porosidade. Assim, por exemplo, os arenitos das Missões (rochas triássicas da formação Missões ou Botucatu, ou cretáceas da formação Serra Geral, no caso da Missão de São Miguel) podem ser quartzitos se estão bem cimentados, ou podem ser do tipo laje (laminares), contendo maior ou menor quantidade de argilas. As argamassas podem ser formuladas à base de cal ou de cimento Portland. Estas últimas podem ter sido introduzidas nas intervenções efetuadas ao longo dos anos. Estas variações de composição levam a variações de textura e porosidade, razão pela qual a resposta de cada material será diferente frente a um mesmo fator de degradação. Como a pedra é o material geralmente mais frequente nas estruturas das Missões, é usada como exemplo para explicar os fenômenos de deterioração.

Os fatores de deterioração dos materiais pétreos são vários, e podem subdividir-se, numa primeira instância, entre os que afetam fisicamente os materiais e os que os afetam químicamente. Mas esta subdivisão, como se verá, é aproximada, pois muitas vezes os efeitos podem estar combinados.

As cargas que suporta uma estrutura, se não estão bem distribuídas, podem resultar em fraturas ou em rupturas de seus elementos. De forma semelhante, as vibrações que possam afetar a estrutura podem gerar, se forem suficientemente grandes (por exemplo, no caso de um terremoto), a desestabilização da estrutura com seus efeitos mecânicos conseqüentes. Estes efeitos também podem ser o resultado do crescimento de raízes, principalmente de arbustos e de árvores maiores, como ocorre nas Missões Jesuíticas dos Guaraníes.



Entre los factores químicos, el agua puede considerarse como el más importante. La razón para esto es que el agua es la base para otros fenómenos de deterioro. En primer lugar, algunos materiales, tales como los morteros de cal o las piedras calizas, son susceptibles a disolución química por el agua, que también puede generar presiones físicas al congelar. El agua es indispensable para el crecimiento de microorganismos y plantas, para la disolución de sales solubles y su transporte y, finalmente, interactuando con arcillas, de modo que éstas expandan o contraigan dependiendo de la cantidad de agua presente. Los párrafos siguientes dan una breve introducción al tema.

1. El agua

El agua se presenta normalmente bajo dos estados: como agua líquida y como vapor de agua. Pero se debe tener en cuenta que el pasaje del estado líquido al estado gaseoso es constante y en ambas direcciones. Esto se representa normalmente con la ecuación:



El equilibrio de esta reacción depende de la temperatura y de la humedad ambiente. Por ejemplo: si tenemos un vaso lleno de agua y lo dejamos expuesto al ambiente, el agua del vaso se irá evaporando y eso dependerá de la temperatura y de la humedad ambiental. Si la humedad es baja y la temperatura es alta, se evaporará rápidamente. Si la humedad es muy alta, la evaporación será más lenta y si el agua está bastante más fría que la temperatura del ambiente, puede llegar a condensar.

Entre os fatores químicos, a água pode ser considerada como a mais importante. O motivo para isto é que a água é a base para outros fenômenos de deterioração. Em primeiro lugar, alguns materiais, tais como as argamassas de cal ou as pedras calcárias, são suscetíveis à dissolução química pela água, que também pode gerar pressões físicas ao congelar. A água é indispensável para o crescimento de microorganismos e plantas, para a dissolução de sais solúveis e seu transporte. Na interação com argilas, permite que estas se expandam ou se contraíam, dependendo da quantidade de água que esteja presente. Os parágrafos seguintes dão uma breve introdução ao tema.

1. A água

A água se apresenta normalmente sob dois estados: como líquido ou como vapor. Entretanto, deve-se considerar que a passagem do estado líquido ao estado gasoso é constante e em ambas as direções. Isto se representa normalmente como na equação:



La molécula de agua, H_2O , tiene forma triangular y es plana, ya que tres puntos, los átomos de oxígeno y los dos de hidrógeno, definen un plano.

A molécula de água, H_2O , tem forma triangular e é plana, uma vez que três pontos, os átomos de oxigênio e os dois de hidrogênio, definem um plano.

Fig 1. Esquema aproximado de una molécula de agua, no a escala. Aunque los átomos tienen forma aproximadamente esférica, al combinarse pierden en parte esa forma. La forma triangular se define desde el centro de cada átomo.

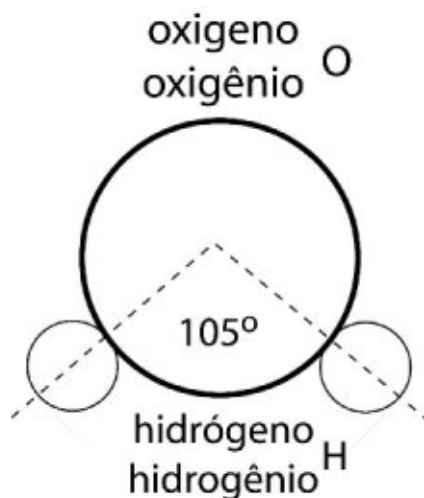


Fig.1. Esquema aproximado de uma molécula de água, sem escala. Ainda que os átomos tenham uma forma aproximadamente esférica, ao combinar-se perdem parte dessa forma. A forma triangular se define a partir do centro de cada átomo.

El ángulo formado por las uniones interatómicas resulta en que la punta de la molécula donde está el átomo de oxígeno tiene una carga negativa con respecto a la inferior donde se encuentran los dos átomos de hidrógeno. Por esta razón, el agua es capaz de transmitir la electricidad.

O ângulo formado pelas uniões interatômicas provoca que na ponta da molécula onde está o átomo de oxigênio tenha uma carga negativa em relação à inferior onde se encontram os dois átomos de hidrogênio. Por esta razão, a água é capaz de transmitir a eletricidade.

La diferencia entre el agua líquida y el vapor de agua, es que en éste último, las moléculas no están asociadas entre ellas o solamente en pequeños grupos de dos o tres. Pero en estado líquido, están asociadas en grupos de cinco o más moléculas. La asociación ocurre al bajar la temperatura, pues las moléculas pierden energía y se mueven cada vez más lentamente, lo que da la oportunidad de su asociación. Si continúa bajando la temperatura, el agua líquida se convierte en hielo y entonces todas las moléculas se hallan asociadas formando una estructura cristalina.

A diferença entre a água líquida e o vapor d'água é que, neste último, as moléculas não estão associadas entre si ou somente em pequenos grupos de duas ou três. No estado líquido, elas estão associadas em grupos de cinco ou mais moléculas. A associação ocorre ao baixar a temperatura, pois as moléculas perdem energia e se movem cada vez mais lentamente, o que permite a sua associação. Se a temperatura continua baixando, a água líquida se converte em gelo e então todas as moléculas se associam, formando uma estrutura cristalina.

Debido a que la asociación de las moléculas de agua se hace por intermedio de los átomos de hidrógeno, lo que se denomina "puente de hidrógeno", la asociación total en el estado sólido ocupa más espacio que la misma cantidad de agua en estado líquido donde la asociación es más fluida. Por lo tanto, la densidad del hielo es más baja que la del agua, que tiene su mayor densidad a los $4^{\circ}C$.

Em função de que a associação das moléculas da água se faz por meio dos átomos de hidrogênio - o que se denomina de "ponte de hidrogênio" - a associação total em estado sólido ocupa mais espaço que a mesma quantidade de água em estado líquido, onde a associação é mais fluida. Portanto, a densidade do gelo é mais baixa do que a da água, que tem sua maior densidade a $4^{\circ}C$.



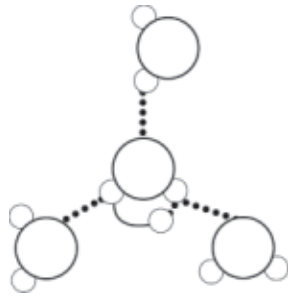


Fig. 2 (izq). Esquema de la estructura del agua líquida donde 4 o 5 moléculas de agua están ligadas por “puentes de hidrógeno” entre el hidrógeno de una molécula y el oxígeno de otra.

Esquema da estrutura da água líquida, onde estão ligadas quatro ou cinco moléculas de água. As uniões entre moléculas de água se realizam pelas “pontes de hidrogênio” - entre o hidrogênio de uma molécula e o oxigênio de outra.

2. El agua en los materiales porosos

El agua puede penetrar en los materiales porosos tanto en estado de vapor, como en estado líquido. En el primer caso penetra por difusión en los poros del material. La cantidad de agua que quedará retenida (adsorbida) por el material dependerá de sus características y de la humedad ambiental. Esta última se expresa generalmente como humedad relativa.

La humedad relativa es el cociente de la cantidad de agua presente en el aire a una temperatura dada y la que podría haber si el aire estuviera saturado a esa temperatura.

Como líquido, el agua puede penetrar por efectos de capilaridad, es decir, porque el agua tiende a subir más en capilares de pequeño diámetro que en conductos más anchos. Este fenómeno se llama “ascenso capilar”. Cuánto más pequeño el diámetro del capilar, mayor será el ascenso. En general, la máxima altura que el agua podría alcanzar por este fenómeno en materiales de construcción (piedra, mortero, cemento, etc.) es de unos 2 metros,

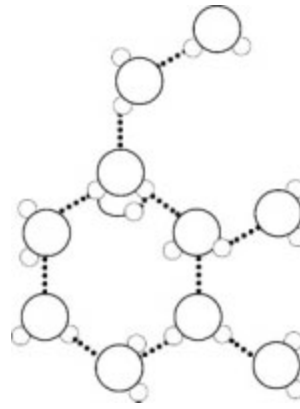


Fig. 2 (der). Esquema de la estructura del agua sólida, hielo. Los hexágonos que se forman se reflejan en la forma hexagonal de los cristales de nieve.

Esquema da estrutura da água sólida, gelo. Os hexágonos que se formam se refletem na forma hexagonal dos cristais de neve.

2. A água nos materiais porosos

A água pode ingressar nos materiais porosos tanto em estado de vapor como em estado líquido. No primeiro caso entra por difusão, por intermédio dos seus poros. A quantidade de água que ficará retida (adsorbida) dependerá das características do próprio material, assim como da umidade do ambiente. Esta última geralmente se expressa como umidade relativa.

A umidade relativa é o quociente da quantidade de água presente no ar a uma dada temperatura e a que se teria se o ar estivesse saturado a esta mesma temperatura.

Como líquido, a água pode penetrar por efeito de capilaridade, como se diz, porque a água tende a subir mais em capilares de pequeno diâmetro que em vasos mais largos. Este fenômeno se chama “ascensão capilar”. Quanto menor o diâmetro do vaso capilar, maior será a ascensão. Em geral, a altura máxima que a água poderia alcançar por este fenômeno em materiais de construção (pedra, argamassa, cimento, etc.) é de 2 metros de altura, ainda que, geralmente, só chegue a 1 metro. O



aunque generalmente solo alcanza 1 metro. La razón para esto es que la velocidad promedio de ascenso en los capilares más finos es muy lenta mientras que en los capilares más gruesos es mayor (aunque alcance un nivel mucho menor). Por lo tanto, habiendo una mezcla de capilares, el equilibrio se establece alrededor de un metro de altura.

En el caso de superficies horizontales sobre las cuales se puede acumular el agua, aparte del fenómeno de absorción capilar también influirá la cantidad de agua acumulada, ya que ejercerá un peso (presión) para entrar en el material. Se habla entonces de la permeabilidad del material.

La presencia de grietas o rajaduras también facilita la penetración del agua, como ser cuando llueve. En este caso se habla de filtraciones. Aquí el fenómeno es más complejo, pues a la penetración de agua en una abertura mayor (grieta) se le suma la posible acumulación de agua y la absorción capilar.

Pero el agua también puede evaporarse del material si la humedad relativa del ambiente es menor que la que se genera en el micro-ambiente del material. La velocidad de secado del material también depende del tipo de poros que tiene. Poros de mayor diámetro permitirán una evaporación más rápida, los de menor diámetro llevarán a tiempos de secado más largos

3. Los materiales y su porosidad

Los materiales porosos se caracterizan por la distribución del tamaño (diámetro) de sus poros, lo que determinará su porosidad total. Una misma porosidad puede ser generada por pocos poros de gran diámetro ($>0,2$ mm) o por muchos poros de menor diámetro ($<0,2$ mm). En el primer caso, el material tenderá a absorber el agua más rápidamente, aunque el ascenso capilar será bajo. Y también perderá el agua más rápido. Por lo contrario, si el material tiene muchos poros de pequeño diámetro, absorberá el agua más lentamente, pero ésta alcanzará un mayor ascenso, y su secado será también más lento, pues el sistema de poros de menor diámetro tenderá a retener el agua.

motivo para esto é que a velocidade média de ascensão nos capilares mais finos é muito lenta, enquanto que nos capilares mais grossos é maior (ainda que alcance a um nível menor). Portanto, tendo um conjunto de diferentes tipos de capilares, o equilíbrio se estabelece por volta de um metro de altura.

No caso de superfícies horizontais sobre as quais se pode acumular a água, além do fenômeno de absorção capilar também influirá a quantidade de água acumulada, uma vez que esta exercerá seu peso (pressão) para entrar no material. Trata-se, então, da permeabilidade do material.

A presença de fissuras ou rachaduras também facilita a entrada da água, como ocorre quando chove. Neste caso, estamos falando de infiltrações. Aqui o fenômeno é mais complexo, pois ao ingresso de água em uma abertura maior (rachadura) se soma uma eventual acumulação de água e a absorção capilar.

Mas a água também pode evaporar se a umidade relativa do ambiente é menor que a que se gera no micro-ambiente do próprio material. A velocidade de secagem do material também depende do tipo de poros que este possui. Poros de maior diámetro permitirão uma evaporação mais rápida, enquanto que os de menor diámetro levarão a um tempo de secagem maior.

3. Os materiais e sua porosidade

Os materiais porosos se caracterizam pela distribuição do tamanho (diámetro) de seus poros, o que determinará sua porosidade total. Uma mesma porosidade pode ser gerada por poucos poros de grande diámetro ($>0,2$ mm) ou por muitos poros de menor diámetro ($<0,2$ mm). No primeiro caso, o material tenderá a absorver a água mais rapidamente, ainda que a ascensão capilar seja mais baixa. Mas também perderá a água mais rapidamente. Em contraposição, se o material tem muitos poros de pequeno diámetro, absorverá a água mais lentamente, mas esta alcançará uma maior altura e sua secagem será mais lenta, pois o sistema de poros de menor diámetro tenderá a reter a água por mais tempo.



La Tabla 1 presente la porosidad de las principales piedras utilizadas en las Misiones Jesuíticas de los Guaraníes.

A Tabela 1 apresenta a porosidade das principais rochas utilizadas nas Missões Jesuíticas dos Guaraní.

Tabla 1 **Tabela 1**

Material	Porosidad Porosidade
Asperón duro (macizo) <i>Arenito duro (compacto)</i>	~ 1 %
Asperón semi-duro (laja) <i>Arenito semi-duro (laje)</i>	~ 3,3 %
Asperón blando (laja) <i>Arenito mole (laje)</i>	~ 3,5 %
Itacurú	~ 9%
Mortero de cal: arena <i>Argamassa de cal: areia</i>	~ 14 %
Mortero de cemento: arena <i>Argamassa de cimento: areia</i>	~ 6%

4. Acción química sobre materiales calcáreos

Materiales que contienen el mineral calcita, formado por carbonato de calcio, CaCO₃, tales como las piedras calizas, los morteros de cal aérea y areniscas calcáreas, son susceptibles a la disolución por el agua.

El carbonato de calcio es un compuesto que se puede considerar insoluble en agua, pero como el agua de lluvia disuelve siempre el anhídrido carbónico, (CO₂), presente en el aire, se forma ácido carbónico (H₂CO₃). El ácido carbónico está parcialmente dissociado en el ión bicarbonato, (HCO₃⁻), y el ión hidrógeno o hidrogenión, (H⁺), que es el agente corrosivo de los ácidos. Por lo tanto, el agua de lluvia “pura”, aún sin otros contaminantes de origen industrial, tales como los óxidos de sulfuro o de nitrógeno, es ácida con un pH de aproximadamente 5,6.

4. Ação química sobre materiais calcários

Materiais que contenham o mineral calcita, formado por carbonato de cálcio, CaCO₃, tais como as pedras calcárias, as argamassas de cal aérea e arenitos calcários, são suscetíveis à dissolução pela água.

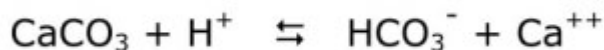
O carbonato de cálcio é um composto que pode ser considerado insolúvel em água, mas como a água da chuva geralmente dissolve o anidrido carbônico (CO₂) presente no ar, se forma o ácido carbônico (H₂CO₃). O ácido carbônico está parcialmente dissociado no íon bicarbonato, (HCO₃⁻), e o íon do hidrogênio, (H⁺), que é o agente corrosivo dos ácidos. Portanto, a água “pura” da chuva, sem outros poluentes de origem industrial tais como os óxidos sulfúricos ou de nitrogênio, é ácida, com um pH de aproximadamente 5,6.

Ecuación 2 **Equação 2**



La reacción de disolución de la calcita es:

Ecuación 3



La disolución de la calcita es un fenómeno lento, de modo que su efecto sólo es perceptible a muy largo plazo. Para el caso de mármoles y piedras calizas compactas, se requieren varios siglos. Es evidente que el proceso se acelera con una mayor frecuencia de lluvias, así como con un aumento de porosidad del material y/o menor tamaño de los cristales de calcita. Por esta razón, los morteros de cal, con una porosidad relativamente alta (>10%) y formados por cristales de calcita muy pequeños (en el orden de unos micrones, es decir la milésima parte de un milímetro), son mucho más susceptibles a esta degradación que un mármol, que tiene una porosidad mucho menor (<2%) y cristales de calcita mucho mayores (en el orden de unos milímetros).

El proceso se acelera en presencia de polución aérea, pues en ese caso se forman ácidos más agresivos tales como el ácido sulfúrico y el nítrico.

En estos casos, el pH de la lluvia en el inicio del evento, cuando el agua líquida disuelve los gases presentes en la atmósfera, puede bajar de su valor normal de pH (aproximadamente 6) a valores tan bajos como pH 4 o 3. Como el pH es una función logarítmica, la concentración del ión hidrógeno llega a ser casi cien a mil veces mayor que la de la lluvia pura.

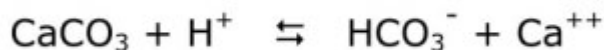
Si tomamos el valor normal como pH 6 (del 5.6) de pH 6 a 4 hay dos unidades, o sea cien, y de 6 a 3 son tres unidades, o sea mil. La concentración de ion hidrogeno se incrementa por lo tanto en cien a mil veces.

5. Materiales con arcillas

Las arcillas son minerales de la familia de los filosilicatos, es decir que tienen una estructura laminar como la mica. Ésta refleja su estructura a nivel molecular, ya que está formada por “láminas” de sílice o alúmina. El caolín es la arcilla que tiene la

A reação de dissolução da calcita é:

Equação 3



A dissolução da calcita é um fenômeno lento, de modo que seu efeito só é perceptível em longo prazo. No caso de mármoles e pedras calcárias compactas, são necessários vários séculos. É evidente que o processo se acelera com uma maior frequência de chuvas, assim como com o incremento da porosidade do material e/ou menor tamanho dos cristais de calcita. Por este motivo, as argamassas de cal, com uma porosidade relativamente alta (>10%) e formadas por cristais de calcita muito pequenos (da ordem de microns - isto é, da milésima parte de um milímetro), são muito mais suscetíveis a esta degradação que um mármore, que tenha uma porosidade muito menor (<2%) e cristais de calcita muito maiores (da ordem de alguns milímetros).

O processo se acelera na presença de poluição aérea, pois nesse caso se formam ácidos mais agressivos, tais como o ácido sulfúrico e o nítrico.

Nestes casos, o pH da chuva no seu início, quando a água líquida dissolve os gases presentes na atmosfera, pode baixar de seu valor normal (aproximadamente 6) a valores tão baixos como pH 4 ou 3. Como o pH é uma função logarítmica, a concentração do ión hidrogênio chega a ser quase cem a mil vezes maior que a da chuva pura.

Se tomarmos o valor normal como pH 6 (do 5.6) de pH 6 a 4 temos duas unidades, ou seja cem, e de 6 a 3 são três unidades, ou seja mil. A concentração do ión hidrogênio se incrementa, portanto em cem a mil vezes.

5. Materiais com argilas

As argilas são minerais da família dos filosilicatos; isto significa que tem uma estrutura laminar, como a mica. Isso reflete sua estrutura em nível molecular, que está formada por “láminas” de sílice ou alumina. O caulim é a argila que tem a estru-



estructura más sencilla en la que se alternan estas dos láminas. Otras arcillas tienen una estructura más compleja, por ejemplo, donde una lámina de alúmina está en sandwich con dos de sílice, como en el caso de las arcillas expansivas.

Estos minerales, en presencia de agua (o aún de humedad ambiente), la absorben tanto líquida como en vapor, y ésta se intercala entre las láminas mencionadas. Esto origina la expansión del mineral.

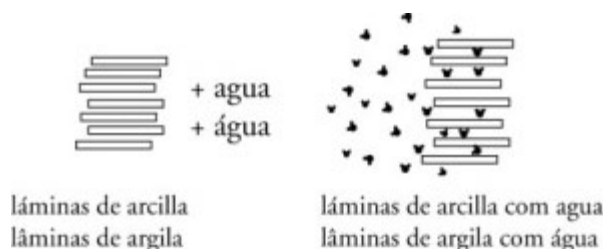


Fig. 3. Diagrama ilustrando como las arcillas, laminillas finas que tienden a apilarse, se expanden en presencia del agua, pues ésta penetra entre ellas. Hay algunas arcillas, llamadas expansivas, que muestran este fenómeno en un grado muy superior al resto y, si están presentes en los materiales, ya sea una roca o un mortero, causan su deterioro.

Los materiales que contienen arcillas, tales como el adobe, la piedra itacurú o las cerámicas que no fueran cocidas a temperaturas suficientemente altas, tienden a adsorber agua cuando la humedad es alta, provocando la dilatación del material. Al disminuir la humedad ambiente, el material pierde el agua adsorbida y se contrae. Evidentemente, la expansión es mayor cuanto más agua absorba el material, de modo que el máximo de expansión ocurre cuando el material está totalmente sumergido en agua.

El deterioro ocurre por el efecto mecánico resultante de los repetidos ciclos de absorción (expansión) – pérdida o desorción (contracción) del agua. Aunque el material no entre en contacto con agua líquida, estos pequeños cambios reiterados duran-

tura mais simples, onde se alternam estas duas lâminas. Outras argilas têm uma estrutura mais complexa, por exemplo, onde uma lâmina de alumina está como em um *sanduíche*, entre duas de sílice, como no caso das argilas expansivas.

Estes minerais, na presença da água (ou da umidade do ambiente), a absorvem tanto como líquido como em vapor, e esta se localiza entre as lâminas mencionadas. Isto gera a expansão do mineral.

Fig. 3. Diagrama ilustrando como as argilas, lamínulas finas que tendem a se empilhar, se expandem na presença da água, pois esta penetra entre elas. Existem argilas, chamadas expansivas, que apresentam este fenômeno em um grau muito superior ao resto e, se estão presentes nos materiais, seja uma rocha ou uma argila, causam sua degradação.

Os materiais que contêm argilas, tais como o adobe, a pedra itacurú ou as cerâmicas que não foram queimadas a temperaturas suficientemente altas, tendem a adsorver água quando a umidade é alta, provocando a dilatação do material. Ao diminuir a umidade do ambiente o material perde a água que absorveu e se contrai. Evidentemente, a expansão é tanto maior quanto mais água o material possa absorver, de modo que o máximo de expansão ocorre quando ele está totalmente submerso.

A deterioração ocorre por efeito mecânico, como uma resultante dos repetidos ciclos de absorção (expansão) – perda ou desorção (contração) da água. Mesmo que o material não entre em contato direto com a água em estado líquido, estas pequenas mudanças repetidas durante os séculos,



te siglos conllevan a la fatiga del material y su pérdida de resistencia, como se puede ver en el deterioro de las cerámicas de los pisos en las Misiones. Evidentemente, si el material entra en repetidos contacto con agua líquida, el deterioro será aún mayor y más rápido.

Hay que tener en cuenta que todos los materiales absorben agua, aún las piedras areniscas más compactas. Pero, en estos casos, la expansión que sufren es mucho menor.

En resumen, ciclos de variación húmedo-seco afectan negativamente los materiales y, en particular, a los que contienen arcillas, por el efecto de expansión-contracción que sufren.

6. Deterioro por sales solubles

Uno de los factores principales del deterioro de materiales inorgánicos porosos es la presencia de sales solubles. Entre ellas, las más frecuentes son la sal común (cloruro de sodio, NaCl), el yeso (sulfato de calcio dihidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), el sulfato de sodio (Na_2SO_4) o de magnesio (MgSO_4), el cloruro de potasio (KCl), y los nitratos de sodio, potasio o amonio (NaNO_3 , KNO_3 , NH_4NO_3). Estas últimas sales son, en general, producto de acción biológica y hay microorganismos que pueden oxidar el ión amonio (NH_4^+) a ión nitrato (NO_3^-) o viceversa. Es importante mencionar que los nitratos, dada su alta solubilidad, son las sales menos perjudiciales. El ión amonio puede también cristalizar como cloruro, sulfato o carbonato.

El origen de estas sales es diverso. Muchas se encuentran en los suelos, como el yeso y el cloruro de sodio; otras son generadas por la colonización biológica, tales como los nitratos y el amonio; y finalmente otras pueden estar presentes en los materiales mismos. Por ejemplo, el cemento Portland común contiene sulfatos alcalinos, tales como el sulfato de sodio y potasio, que pueden ser extraídas por el agua una vez que el cemento fraguó.

Al llegar el agua a un material que contenga sales solubles, éstas se disuelven y migran en solución con el agua. Así penetran en otros materiales poro-

conduzem à fadiga do material e à sua perda de resistência, como se pode ver na deterioração das cerâmicas dos pisos nas Missões. Evidentemente, se o material entra repetidamente em contato com água em estado líquido, a deterioração será maior e mais rápida.

É de se considerar que todos os materiais absorvem água, mesmo as pedras areníticas mais compactas. Mas nestes casos, a expansão que sofrem é muito menor.

Em resumo, os ciclos de variação úmido-seco afetam negativamente os materiais e em particular os que contêm argilas, pelo efeito de expansão-contracção que sofrem.

6. Deterioração por sais solúveis

Um dos fatores principais da deterioração de materiais inorgânicos porosos é a presença de sais solúveis. Entre eles, os mais frequentes são o sal comum (cloreto de sódio, NaCl), o gesso (sulfato de cálcio dihidrato, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), o sulfato de sódio (Na_2SO_4) ou de magnésio (MgSO_4), o cloreto de potássio (KCl) e os nitratos de sódio, potássio ou amônio (NaNO_3 , KNO_3 , NH_4NO_3). Estes últimos sais são, em geral, produtos de ação biológica, e existem microorganismos que podem oxidar o ión amônio (NH_4^+) ao ión nitrato (NO_3^-) ou vice-versa. É importante mencionar que os nitratos, dada sua alta solubilidade, são os sais menos prejudiciais. O ión amônio pode também cristalizar como cloreto, sulfato ou carbonato.

A origem destes sais é diversa. Muitos se encontram nos solos, como o gesso e o cloreto de sódio; outros são gerados pela colonização biológica, tais como os nitratos e o amônio; e, finalmente, outros podem estar presentes nos próprios materiais. Por exemplo, o cimento Portland comum contém sulfatos alcalinos, tais como o sulfato de sódio e potássio, que podem ser extraídos pela água uma vez que o cimento cure.

O contato da água com um material que contenha sais solúveis provoca sua dissolução e eles migram, em solução, junto com a água. Assim, penetram em outros materiais porosos vizinhos por meio da



sos cercanos, por ascenso capilar, infiltraciones, etc. El agua, eventualmente, evapora dejando atrás las sales que llevaba en solución. Las sales, pues, cristalizan en el lugar en el que el agua evapora. Cuando el material está muy húmedo, la evaporación ocurre en la superficie del material y entonces, al cristalizar las sales se forman las denominadas eflorescencias.

Al disminuir la cantidad de agua en el material, el frente de evaporación se desplaza hacia el interior del mismo. Inicialmente esto ocurrirá inmediatamente debajo la superficie, y en ese caso las sales cristalizan formando las sub-florescencias o criptoflorescencias. Esta cristalización de sales dentro del material poroso induce a su deterioro por efectos mecánicos que pueden, en una primera instancia, atribuirse al crecimiento de los cristales de las sales. De esta manera, las sub-florescencias tienden a la exfoliación y/o pulverización del material, dependiendo ésto de la textura del mismo.

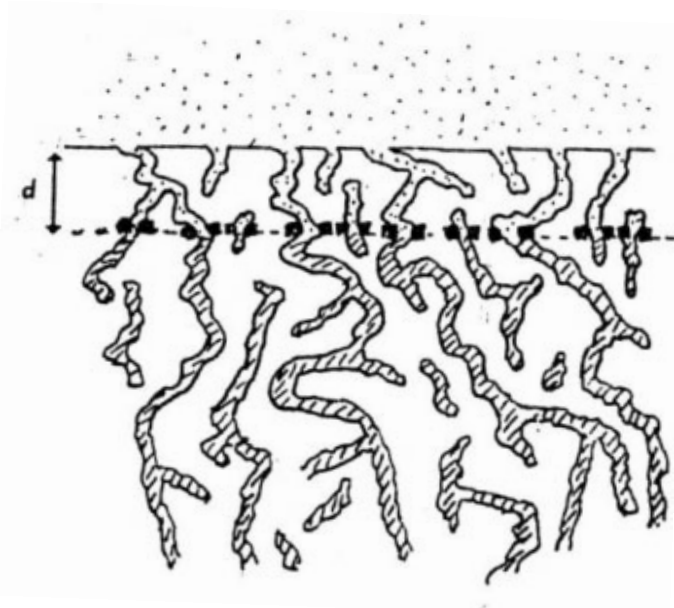


Fig. 4. Cristalización de sales solubles en un material poroso por la evaporación del agua que acarrea las sales. Al secarse el material, el frente de evaporación se traslada desde la superficie al interior del material, normalmente en una zona paralela a la superficie. En ese lugar cristalizan las sales y, por efecto mecánico, pueden delaminar el material superficial, marcado “d” en el diagrama.

ascensão capilar, infiltração, etc. A água geralmente evapora, deixando os sais que a solução carregava. Os sais cristalizam nos locais onde a água evapora. Quando o material está muito úmido a sua evaporação ocorre na superfície e então, quando os sais se cristalizam, se formam as eflorescências.

Ao reduzir a quantidade de água no material, a frente de evaporação se desloca para o seu interior. Inicialmente, isto vai ocorrer sob a superfície, onde os sais cristalizam formando subflorescências ou criptoflorescências. A cristalização de sais no interior de um material poroso induz à sua deterioração por efeitos mecânicos, que podem, em uma primeira instância, ser atribuídos ao crescimento dos cristais de sal. Desta maneira, as subflorescências podem provocar esfoliação e/ou pulverização do material, dependendo de sua textura.

Fig. 4. Cristalização de sais solúveis em um material poroso pela a evaporação da água que carrega os sais. Ao secar, o material, a frente de evaporação se traslada da superfície ao interior do material, normalmente em uma zona paralela à superfície. Nesse lugar se cristalizam os sais e, por efeito mecânico, podem esfoliar o material superficial, marcado “d” no diagrama.



Cuando las sales son muy poco solubles, tal el caso de la calcita, mineral formado por carbonato de calcio (CaCO_3), se forman depósitos superficiales más duros y sólidos los que son denominados concreciones.

El mecanismo de formación de las concreciones es idéntico al descrito para las sales solubles y es el que da origen a las estalactitas que se ven en las estructuras de hormigón, tales como puentes; o a las estalactitas y estalagmitas en cuevas subterráneas.

Esta sal insoluble se puede formar, en el caso particular de las estructuras de las Misiones construidas con areniscas como el asperón rojo y con la piedra itacurú, por la presencia de morteros de cal, y/o de cemento. En estos casos, el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente tanto en la cal, como en el cemento, puede ser lavado de las juntas antes de su fragüe total, esparciéndose sobre las piedras inferiores, y al reaccionar con el anhídrido carbónico (CO_2) del aire producir el carbonato de calcio (CaCO_3), que se visualiza como una capa blanca insoluble de calcita. Las concreciones no presentan un problema de conservación, pero sí un problema estético, pues cambian el color y el aspecto de la piedra sobre la cual se forman.

En general, el mayor problema corresponde al uso de morteros que contienen cemento Portland, pues en este caso, no sólo se lava el hidróxido de calcio, sino también las sales solubles como el sulfato de sodio o el de potasio que pueden dañar el material como mencionado anteriormente.

El yeso también puede originarse por la reacción de la polución aérea con los iones Ca^{++} presentes en los morteros o en materiales calcáreos. El yeso es relativamente poco soluble, de modo que tiende a acumularse fundamentalmente en la superficie del material, bloqueando sus poros.

En conclusión, las eflorescencias salinas y las concreciones de calcita son el resultado de una reacción de los materiales con el agua e indican un problema de infiltración y/o de la presencia de sales solubles. La caracterización de las sales presentes en una eflorescencia contribuye a explicar su

Quando os sais são muito pouco solúveis, como no caso da calcita, mineral formado por carbonato de cálcio (CaCO_3), se formam depósitos superficiais mais duros e sólidos, denominados concreções.

O mecanismo de formação das concreções é idêntico ao descrito para os sais solúveis e é isto que provoca a formação das estalactites que se observam em estruturas de concreto armado, como nas pontes, ou às estalactites e estalagmites de cavernas subterráneas.

No caso particular das estruturas das Missões, construídas com arenitos avermelhados e com pedras itacurú, as concreções podem se formar pela presença de argamassas de cal e/ou de cimento. Nestes casos, o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente tanto na cal, como no cimento, pode ser lavado das juntas antes de sua cura e escorrer sobre as pedras inferiores e ao reagir com o anidrido carbônico (CO_2) do ar, produzir o carbonato de cálcio (CaCO_3), formando uma camada branca insolúvel de calcita. As concreções não se apresentam como um problema de conservação, mas como um problema estético, pois mudam a cor e o aspecto das pedras sobre as quais se formam.

Em geral, o maior problema corresponde ao uso de argamassas que contém cimento Portland, pois neste caso não apenas se lava o hidróxido de cálcio, mas também os sais solúveis como o sulfato de sódio ou o de potássio que podem danificar o material como mencionado anteriormente.

O gesso também pode ser originado pela reação da poluição aérea com os íons Ca^{++} presentes nas argamassas ou em materiais calcários. O gesso é relativamente pouco solúvel, de modo que tende a se acumular principalmente na superfície do material, fechando seus poros.

Em conclusão, as eflorescências salinas e os sedimentos de calcita são resultado de reações de materiais com a água, e indicam problemas de infiltração e/ou a presença de sais solúveis. A caracterização dos sais presentes em uma eflorescência contribui para explicar a sua origem: um carbonato ou



origen: un carbonato o un sulfato soluble, tal como el carbonato o sulfato de sodio o de potasio, que se forma sobre o cerca de una junta son generalmente indicativos de la presencia de cemento Portland en dicha junta. La presencia de una concreción calcárea puede ser el resultado de un mortero de cal aplicado en condiciones no favorables (por ejemplo, justo antes de una fuerte lluvia) o de un mortero adicionado con cemento Portland. El yeso, así como el cloruro de sodio, son las sales más frecuentes y pueden ser aportadas por el entorno mismo. El yeso, siendo relativamente poco soluble, no es tan problemático a corto plazo, pero sí lo es a largo plazo. La presencia de amonio indica una alta contaminación biológica. Por lo tanto es importante determinar qué sales están presentes, y en lo posible, su concentración.

7. Conclusiones

De los varios factores de deterioro, el agua puede considerarse el principal, ya que es fundamental en la “activación” del movimiento de sales solubles dentro del material, así como en la expansión y contracción de materiales arcillosos. Además, como se verá en el capítulo sobre biodeterioro (Capítulo 5), es fundamental para el desarrollo de la biocolonización. Finalmente, la acumulación de polvo y otros materiales, es facilitada si la superficie del material se encuentra húmeda. Por lo tanto, en la conservación de materiales y estructuras, uno de los principales objetivos es el de mantenerlos al reparo del agua.

um sulfato solúvel, tal como o carbonato ou sulfato de sódio ou de potássio, que se forma sobre ou nas proximidades de uma junta são geralmente indicativos da presença de cimento Portland na mesma. A presença de um sedimento calcário pode ser o resultado de uma argamassa de cal aplicada em condições não muito favoráveis (por exemplo, justo antes de uma forte chuva) ou de uma argamassa com adição de cimento Portland. O gesso, assim como o cloreto de sódio, são os sais mais frequentes, e podem ter sido trazidos de seu entorno. O gesso, sendo relativamente pouco solúvel, não é tão problemático em curto prazo, mas sim a longo prazo. A presença de amônio indica uma alta contaminação biológica. Portanto, é importante determinar quais sais estão presentes e, na medida do possível, sua concentração.

7. Conclusões

Dos vários fatores de deterioração, a água pode ser considerada a principal, uma vez que é fundamental para a “ativação” da movimentação de sais solúveis dentro dos materiais, assim como na expansão e contração de materiais argilosos. Além disso, como se verá no capítulo sobre biodeterioração (Capítulo 5), ela é fundamental para o desenvolvimento da biocolonização. Finalmente, a acumulação de pó e de outros materiais é propiciada se a superfície do material se encontra úmida. Portanto, na conservação de materiais e estruturas, um dos principais objetivos é o de mantê-los protegidos da água.

