

Documentazione scientifica su tecnologia di Diretta Interazione Molecolare (DIM)

*Metodo efficace e non invasivo
per la deumidificazione muraria*

La documentazione qui di seguito ha lo scopo di fornire informazioni dettagliate riguardo il problema dell'umidità di risalita nei manufatti murari, le principali cause e le basi scientifiche della tecnologia di Diretta Interazione Molecolare (DIM) offerta da Ecody. Tale documentazione integra le informazioni già presenti sul sito web www.ecodyitalia.com e riassume il materiale presentato in convegni e seminari da Ecody Italia.

Indice:

IL PROBLEMA DELL'UMIDITÀ DI RISALITA	2
LE CAUSE	5
LA TECNOLOGIA ECODRY: DIRETTA INTERAZIONE MOLECOLARE (DIM)	10
CONSIDERAZIONI	12
CONCLUSIONI	13
BIBLIOGRAFIA	13

A cura di:

Prof. Dr. Andrea Trabattoni

*Centre for Free-electron Laser Science, DESY, Notkestr. 85, 22607 Hamburg, Germany
Institute of Quantum Optics, Leibniz Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover, Germany*

Ecody Italia rimane a disposizione per qualsiasi ulteriore richiesta:

Telefono: +39 0392188703

E-mail: info@ecodyitalia.com

Alessandro Giacomello (Direttore Generale)

Arch. Sandro Carbonini (Ufficio Tecnico)

IL PROBLEMA DELL'UMIDITÀ DI RISALITA

Risalita dell'acqua e cristallizzazione salina

L'umidità di risalita è un fenomeno complesso e del tutto naturale che si verifica quando l'acqua presente nel terreno entra in contatto con il materiale murario. Tale interazione tra acqua e muro innesca forze di risalita che si oppongono alla forza di gravità (per ulteriori dettagli si veda la prossima sezione *Le Cause*). Come conseguenza, **l'acqua tende a salire verticalmente nel manufatto** (Fig.1). Tuttavia, la sola risalita

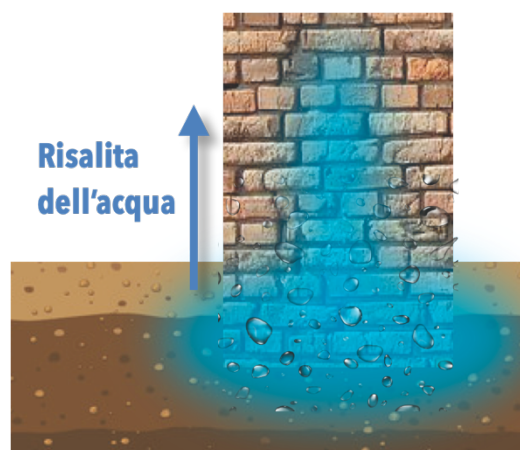


Figura 1

dell'acqua non è l'unico aspetto dell'umidità muraria. Infatti, è la **formazione di sali** nel materiale murario a rappresentare il fulcro del problema, nonché la causa primaria di degrado estetico e danneggiamento funzionale del manufatto. Durante la risalita, l'acqua infatti trasporta elementi chimici che reagiscono con gli elementi già presenti naturalmente nel materiale murario, portando alla formazione di sali.

ESEMPIO: Formazione del salnitro (Nitrato di Potassio):

1. L'acqua trasporta ammoniaca (NH_3) dal terreno.
2. Nel materiale murario è presente carbonato di potassio: (K_2CO_3).
3. L'aria fornisce ossigeno O_2 .
4. La reazione chimica dei sopracitati elementi forma KNO_3 = Salnitro.

Principali sali presenti/creatisi nei materiali murari:

Solfati (Solfato di Calcio, Solfato di Potassio, Solfato di Sodio)

Cloruri (Cloruro di Sodio, Cloruro di Potassio, Cloruro di Magnesio)

Nitrati (Nitrato di Potassio)

Sali complessi (Ettringite, Thaumasite)

I solfati sono caratterizzati da molecole molto piccole e mobili e sono presenti in discreta quantità nel terreno ma soprattutto nei materiali edili (mattoni). I cloruri sono presenti quasi esclusivamente nei terreni delle zone litoranee ma li ritroviamo spesso come sali di reazione all'interno dei materiali da costruzione e nei leganti (malte, cemento etc.). I nitrati sono di natura organica e sono presenti, anche in alta percentuale, in quei terreni in cui si sono svolte

attività legate all'agricoltura e all'allevamento (concimazione dei terreni, prodotti fisiologici legati agli animali); questi sali sono presenti anche in siti in cui vi siano state sepolture (prossimità delle chiese, cripte etc). Thaumasite ed ettringite, invece, si formano a causa della combinazione tra i silicati e gli alluminati già presenti nei materiali da costruzione (in particolare nel cemento, in quasi tutte le malte e in presenza di gesso) e i sali presenti nel terreno trasportati dall'acqua ascendente all'interno dei manufatti.

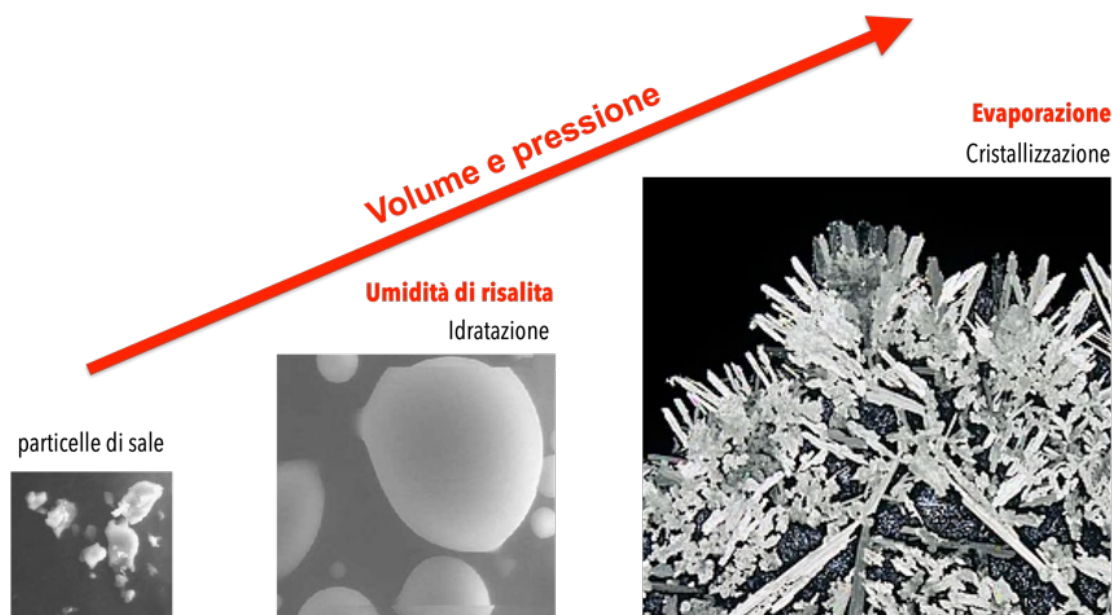


Figura 2

La presenza di sali nel materiale murario rappresenta la causa principale di degrado e danneggiamento, a causa delle loro proprietà di igroscopicità e cristallizzazione. Molti sali infatti sono igroscopici, ossia assorbono efficacemente l'acqua. In questo processo di **idratazione**, il volume del sale può aumentare notevolmente, fino a 3 o 4 volte [1]. Conseguentemente, anche la pressione esercitata dal sale nel materiale murario aumenta proporzionalmente. Studi svolti su antichi templi in Egitto hanno dimostrato pressioni superiori a 1000 atmosfere [2]. In seguito al processo di idratazione, l'evaporazione dell'acqua innesca la **cristallizzazione** del sale in condizioni di supersaturazione. In tali condizioni si verifica una continua crescita cristallina, e il volume occupato dal sale nel materiale aumenta ulteriormente, assieme alla pressione. Questo processo combinato di idratazione e cristallizzazione, con conseguente aumento di volume e pressione (come rappresentato in Fig.2), porta il manufatto al limite di rottura [3]. Si consideri inoltre che i sali, anche in una sola giornata, possono attraversare molteplici cicli di re-idratazione e ricristallizzazione in un processo a *fisarmonica*, costituendo per il manufatto un vero e proprio *martello pneumatico*.

La presenza di sali cristallizzati nel materiale murario dà luogo a fenomeni di efflorescenza (formazioni saline sulla superficie del materiale) e sub-efflorescenza (formazioni saline al di sotto della superficie del materiale), come da esempio in Fig.3.



Figura 3

Si veda la sezione *Considerazioni* per suggerimenti pratici d'intervento su strutture murarie ammalorate, con relativa discussione sulla comparsa di efflorescenze nel processo di deumidificazione.

Ricapitolando:

L'umidità di risalita è un problema complesso e del tutto naturale.

La risalita dell'acqua trasporta elementi chimici che reagiscono con quelli già presenti nel muro: formazione di sali.

I sali rappresentano il vero pericolo per il manufatto murario, a causa delle loro proprietà di idratazione e cristallizzazione.

LE CAUSE

Le proprietà della molecola d'acqua e le principali forze di risalita dell'acqua

Le proprietà di risalita dell'acqua all'interno del materiale murario hanno la loro origine nelle caratteristiche fondamentali della molecola d'acqua. Andiamo a descriverle brevemente. Innanzitutto, l'acqua è una molecola perché è un aggregato di 3 atomi: due atomi di idrogeno e un atomo di ossigeno (Fig. 4). Tali atomi sono disposti in configurazione triangolare, ossia i

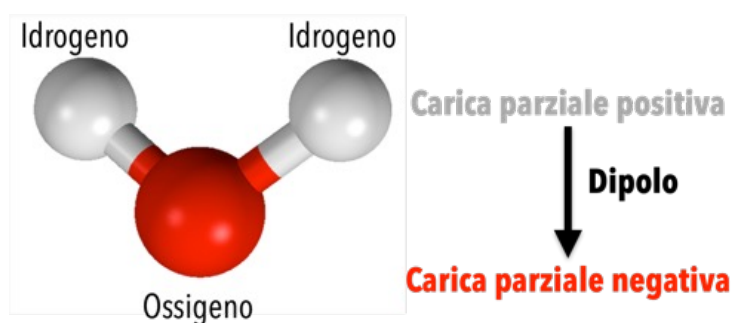


Figura 4

due atomi di idrogeno formano un angolo di circa 104 gradi rispetto all'atomo di ossigeno. A causa di questa geometria, ai due lati della molecola si instaurano una carica parziale positiva (costituita dai due idrogeni) e una carica parziale negativa (costituita dall'ossigeno), dando luogo a un

dipolo elettrico. Per questo motivo la molecola d'acqua è definita *polare*.

La polarità dell'acqua ha alcune conseguenze molto importanti ai fini della nostra discussione e dell'utilizzo della tecnologia Ecodry. Innanzitutto molecole polari, in presenza di un campo elettrico esterno, tendono a orientarsi. Invece molecole apolari, come per esempio l'anidride carbonica (CO₂), non interagiscono con campi elettrici. Tale principio è illustrato in Fig. 5.

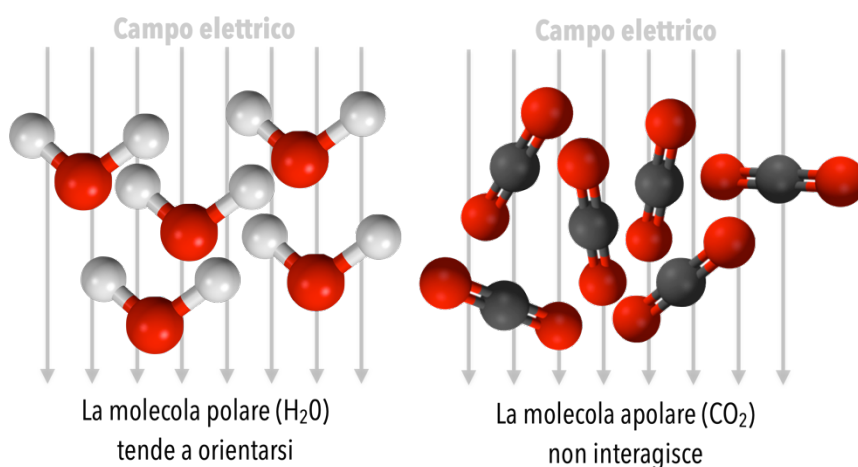


Figura 5

Inoltre, le molecole d'acqua tendono ad agglomerarsi tra di loro in maniera peculiare, ossia ad orientarsi in modo tale che gli atomi di idrogeno di una molecola possano formare un debole legame a lunga distanza con l'atomo di ossigeno delle molecole vicine. Tale legame è detto *legame idrogeno*, e ha una forza che è solo circa il 5% rispetto ai legami tra ossigeno e idrogeni all'interno di una singola molecola (Fig. 6). Nonostante sia molto fragile, il legame idrogeno permette alle molecole d'acqua di agglomerarsi in enormi quantità (migliaia o milioni di molecole). Legami simili si instaurano nel processo di idratazione di ioni salini, quando gli ioni vengono circondati da un agglomerato di molecole d'acqua (Fig. 6).

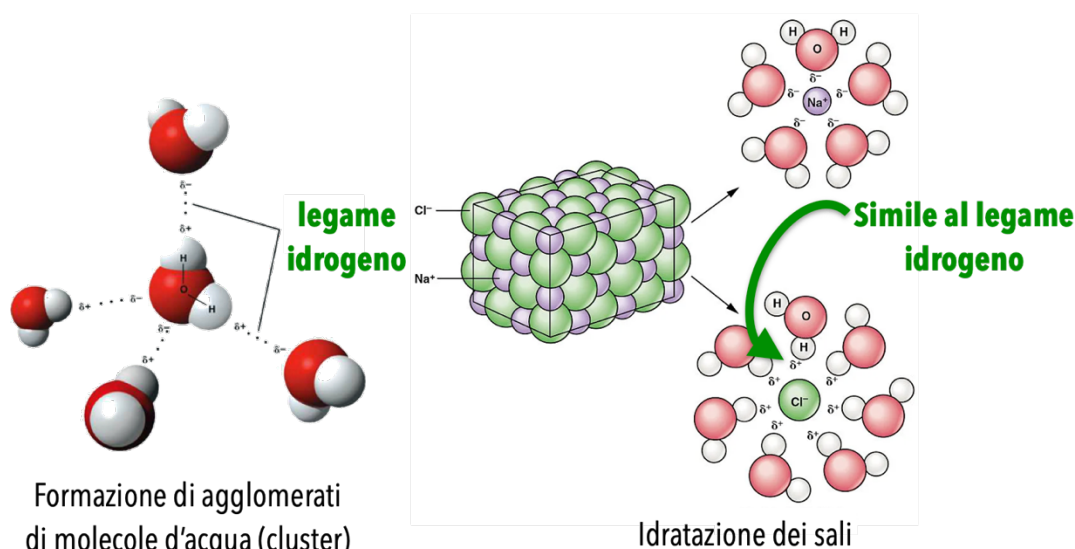


Figura 6

Le proprietà della molecola d'acqua sopra descritte sono responsabili per le principali forze di risalita all'interno di materiale murario. In particolare, l'acqua risale e filtra attraverso la struttura muraria per tre diverse ragioni: **capillarità**, **osmosi** e differenza di **potenziale elettrico** presente tra il terreno e la struttura muraria. Descriviamole brevemente.

Capillarità:

La capillarità è una delle caratteristiche di risalita dell'acqua: questo fenomeno si verifica quando le forze di adesione, dovute all'interazione tra l'acqua e il materiale circostante, prevalgono sulle forze di coesione, dovute all'interazione tra le diverse molecole d'acqua. Un'esemplificazione del processo di capillarità è riportata in Fig. 7. Dalla figura si evince come il predominio delle forze di adesione permette alle molecole dell'acqua di risalire lungo la parete dei capillari. Questo fenomeno è tanto più accentuato quanto minore è il diametro del capillare stesso. La risalita per capillarità induce la superficie dell'acqua ad assumere la tipica forma a menisco. Nell'ottica della nostra discussione, l'acqua risale per capillarità nelle porosità del materiale murario. Ovviamente materiali più porosi presentano una capillarità

più accentuata. Si pensi che il tufo giallo napoletano ha una porosità (e quindi un coefficiente di imbibizione) 300 volte maggiore rispetto al marmo di Carrara.

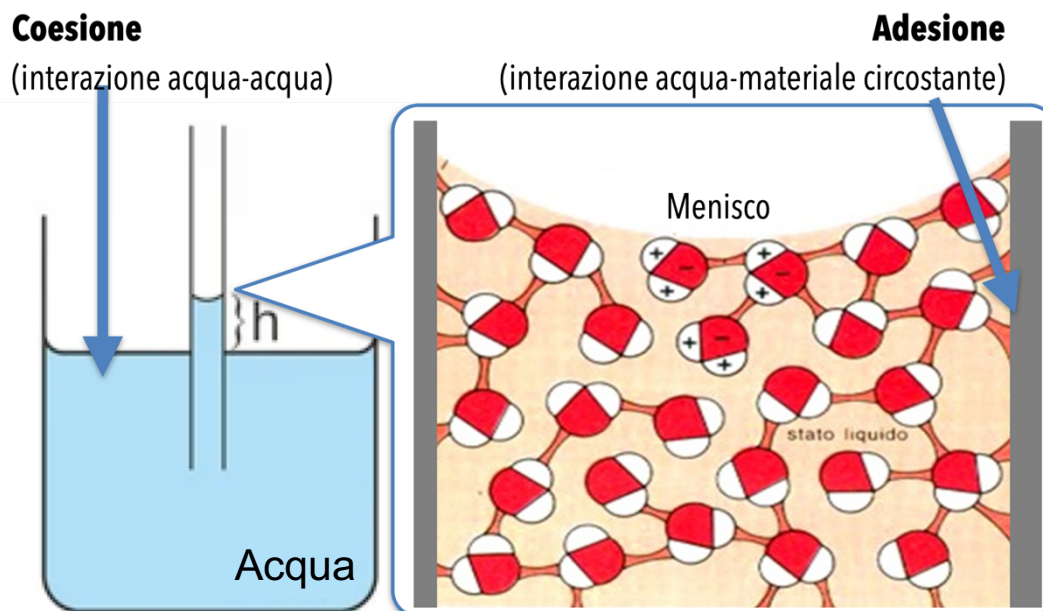


Figura 7

Osmosi:

Quando dei sali sono disciolti in acqua, l'acqua è definita *solvente* e il sale *soluto*. Un tipico processo di osmosi è esemplificato in Fig. 8. Immaginiamo che due sezioni di un contenitore siano divise da una membrana semipermeabile, che faccia passare solo il solvente ma non il soluto. Nella configurazione iniziale in figura (pannello a sinistra), il livello dell'acqua è uguale da entrambe le parti del contenitore, ma la concentrazione di soluto è molto più alta nella parte a destra. In queste condizioni, l'acqua tende a migrare in modo tale da equilibrare la concentrazione di soluto, fino ad ottenere la configurazione mostrata nel pannello a destra. Questa migrazione di solvente verso zone a più alta concentrazione di soluto è detta *osmosi*. Come mostrato in figura, l'osmosi può indurre l'acqua a salire in verso opposto rispetto alla forza di gravità, sempre favorita dalla capillarità, ed è una delle cause principali dell'umidità di risalita in manufatti murari. Infatti, Il materiale murario può contenere sali anche in concentrazione maggiore che nel terreno. In queste condizioni, l'acqua tende a salire nel muro per osmosi nei canali capillari. Tuttavia, l'acqua risalita è soggetta a evaporazione aumentando così di nuovo la densità di sale. In questo modo, l'osmosi funziona come una pompa che pesca continuamente acqua dal terreno e la trasporta nel muro.

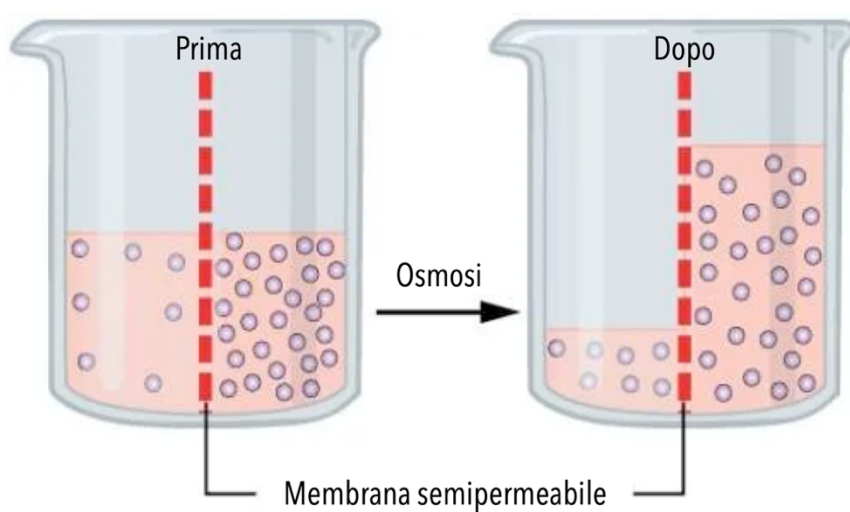


Figura 8

Differenza di potenziale elettrico:

Spesso si misura sperimentalmente una differenza di potenziale elettrico tra il terreno e la struttura muraria. Le cause di questo squilibrio elettrico possono essere molteplici. Per esempio, il materiale murario può avere un pH basico nel caso siano presenti abbondanti quantità di calce, o mattone non refrattario.

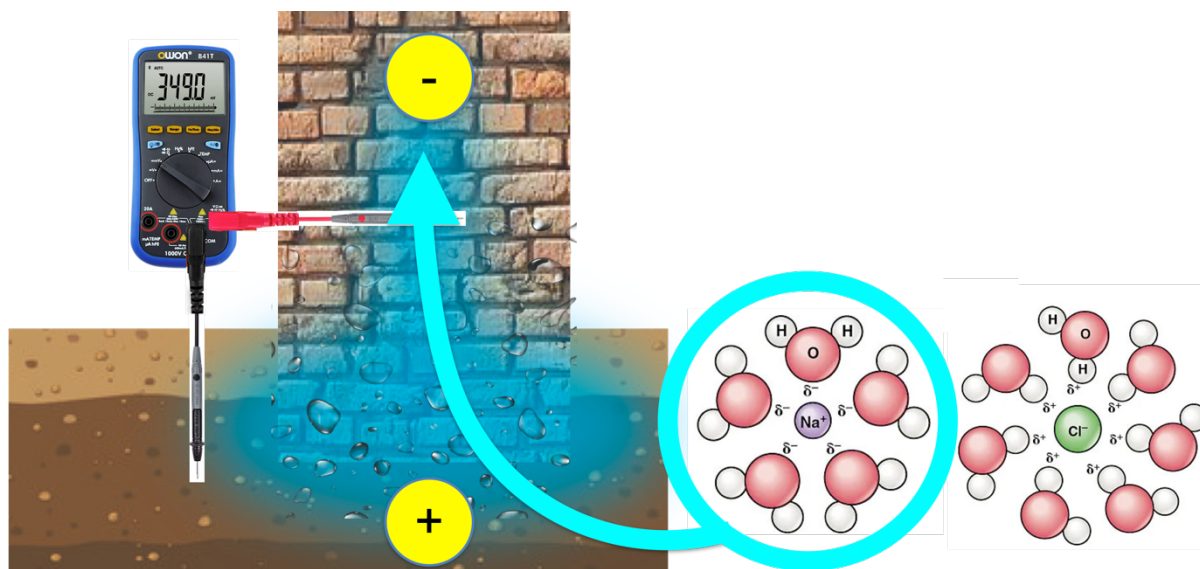


Figura 9

In queste condizioni, l'eccedenza di ioni idrossili (OH^-) rappresenta una carica totale negativa. Analogamente, il terreno può avere una falda acquifera acida con eccedenza di ioni idrogeno (H^+), rappresentando quindi una carica totale positiva. In queste condizioni di differenza di potenziale elettrico, gli ioni salini tendono a muoversi nel potenziale formando una corrente.

Gli ioni positivi (Sodio Na^+ , per esempio) si muovono verso l'alto trascinando con sé le molecole d'acqua a cui sono legati. Per queste ragioni, anche la differenza di potenziale rappresenta un'importante causa di umidità di risalita. Per completezza, facciamo una precisazione: seguendo il ragionamento sopra descritto, ci si potrebbe aspettare anche una corrente discendente di ioni negativi (Cloro Cl^- , per esempio), che dovrebbe trascinare umidità verso il terreno. Purtroppo la corrente discendente di ioni negativi è molto minore di quella ascendente per due motivi: primo, gli ioni negativi sono tipicamente più grandi e pesanti di quelli positivi, e quindi hanno minore mobilità; secondo, le correnti discendenti sono ostacolate dalla risalita capillare.

Ricapitolando:

L'acqua è una molecola polare e tende a orientarsi se esposta a un campo elettrico.

L'acqua si unisce ad altre molecole tramite deboli legami idrogeno.

Le proprietà dell'acqua innescano la risalita tramite tre meccanismi: capillarità, osmosi, differenza di potenziale elettrico.

LA TECNOLOGIA ECODRY: DIRETTA INTERAZIONE MOLECOLARE (DIM)

Tecnologia efficace e non invasiva per la deumidificazione muraria

La storia della deumidificazione muraria affonda le sue radici in epoca antica. Per esempio, esistono documenti che raccontano la lotta di Michelangelo Buonarroti contro l'umidità muraria durante i lavori nella Cappella Sistina a Roma. A quei tempi, le efflorescenze venivano trattate con olio di noci o di lino per renderle più trasparenti, oppure si cercava di rimuoverle in maniera non invasiva utilizzando mollica di pane. In età moderna, sono state introdotte molte tecnologie, come per esempio: taglio meccanico (taglio in profondità del muro); barriera chimica (inserzione di liquidi alla base del muro); elettroosmosi (barre metalliche inserite nel muro); intercapedine orizzontale o verticale (strati d'aria o vespai); metodo Knapen (sifoni aeranti); controparete (strato murario aggiuntivo); impermeabilizzazione esterna (guaine isolanti); applicazione di intonaci traspiranti (macroporoso, microporoso, a calce idraulica naturale - NHL, dall'inglese Natural Hydraulic Lime - per favorire la sola evaporazione).

La tecnologia Ecodry, a differenza dell'edilizia tradizionale, agisce direttamente sull'**acqua** e non sul muro. Così facendo, agisce sulle **cause** e non sui sintomi. Le apparecchiature Ecodry sono assolutamente ecocompatibili, totalmente versatili, non invasive e con consumi irrisori. Gli strumenti Ecodry sono in grado di ripristinare una fisiologica percentuale di acqua nei muri. La tecnologia si basa su un dispositivo che emette **onde elettromagnetiche** che

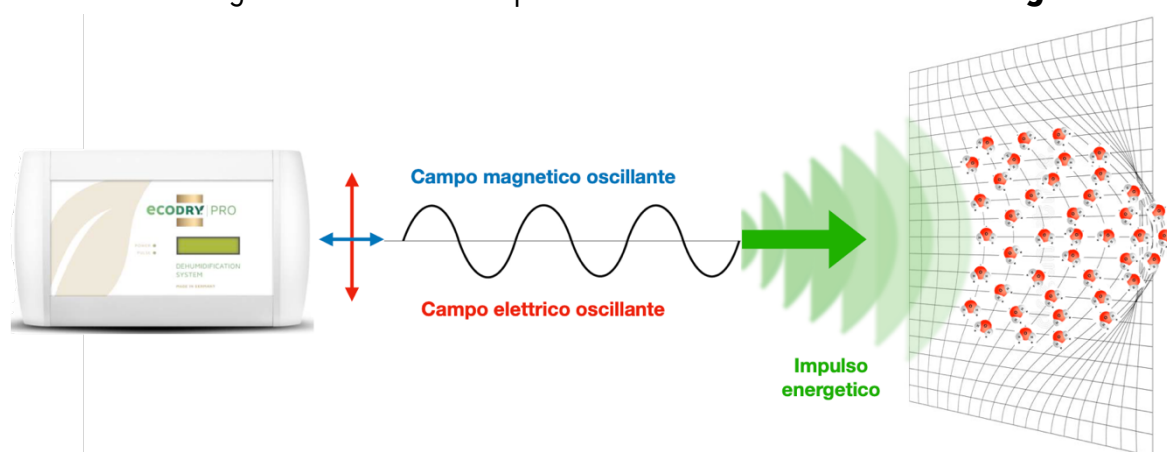


Figura 10

oscillano a **frequenza estremamente bassa** (nell'ordine dei 100 Hz). Come confronto, si consideri che le onde emesse da un dispositivo WiFi o all'interno di un forno a microonde sono centinaia di milioni di volte più alte (nell'ordine dei GHz, 1 GHz = 1000000000 Hz). Pensando al funzionamento di un forno a microonde, intense onde nei GHz oscillano in maniera *risonante* con il movimento rotazionale delle singole molecole d'acqua presenti

nell'alimento. Così facendo, a livello *microscopico*, le molecole d'acqua sono indotte a ruotare velocemente, aumentando statisticamente la temperatura dell'alimento.

Le onde del dispositivo Ecodry interagiscono con l'acqua in modo completamente diverso. Primo, non hanno frequenze abbastanza alte per innescare la rotazione delle molecole e quindi non scaldano il manufatto. Questo aspetto è estremamente importante per preservare, per esempio, antichi intonaci e affreschi. Secondo, frequenze estremamente basse come quelle prodotte dai dispositivi Ecodry interagiscono con l'acqua in maniera *macroscopica*, ossia non più con le singole molecole separatamente. Questo concetto è dimostrato e ben noto nell'ambito della spettroscopia dielettrica [4]. Per essere più chiari, quando interagisce con frequenze molto basse, l'acqua si comporta come un materiale macroscopico, ossia un reticolo composto da moltissime molecole per il quale si può definire, per esempio, la permittività elettrica, proprio come si fa per una lastra di vetro o una piastra ceramica. Nello specifico della nostra discussione, bisogna immaginare questo grande reticolo d'acqua che si estende anche per metri nel materiale murario all'interno dei canali capillari. Quando viene esposto a basse frequenze, **il reticolo d'acqua tende a deformarsi** e a orientarsi lungo le linee di forza del campo elettrico, proprio perché formato da tantissime molecole polari (si veda la spiegazione precedente sulla polarità dell'acqua). Questo meccanismo è esemplificato in Fig. 10. Questa deformazione del reticolo d'acqua ha conseguenze importantissime sull'umidità muraria, perché:

1. La deformazione del reticolo altera la geometria dell'agglomerato (cluster) di molecole d'acqua, che sono tenute insieme dai deboli legami idrogeno.
2. Una porzione dei legami idrogeno si indebolisce e il reticolo tende a *spezzarsi*.
3. Le forze di adesione si indeboliscono e così anche la salita capillare.
4. Conseguentemente, anche la salita per osmosi viene ostacolata.
5. Così come i legami idrogeno, anche i legami tra acqua e ioni salini si indeboliscono.
6. Nella salita per differenza di potenziale elettrico, gli ioni trascinano meno acqua.

Risultato: La tecnologia Ecodry, in modo del tutto non invasivo, **toglie all'acqua la sua capacità di arrampicarsi nel muro**, indebolendo le tre forze di risalita (capillarità, osmosi, potenziale elettrico). In questo modo, permette alla forza di gravità di prevalere e l'acqua torna nel terreno. Si noti che l'efficacia di questa tecnologia si basa su un'attenta conoscenza scientifica delle proprietà molecolari e macroscopiche dell'acqua, oltre a uno studio delle cause dell'umidità di risalita muraria.

CONSIDERAZIONI

Nessun inquinamento elettromagnetico

Le onde elettromagnetiche prodotte dai dispositivi Ecodry sono estremamente deboli. In particolare, il campo elettrico è pari a $< 500 \text{ V/m}$ e il campo magnetico $< 1 \text{ uT}$ (misurazione a 30 cm di distanza dal dispositivo). Questi valori sono ben al di sotto dei valori di soglia espressi nella normativa 2013/35/EU sull'inquinamento elettromagnetico. Inoltre, il campo elettromagnetico decade rapidamente già a piccole distanze dal dispositivo (propagazione in aria). Infatti, il campo elettrico decade con il quadrato della distanza. Esempio: 1 V/m a 1 cm, 0.0001 V/m a 100 cm, ossia 10mila volte più debole. Il campo magnetico a media distanza decade con il cubo della distanza. Esempio: 1 T a 1 cm, 0.000001 T a 100 cm, un milione di volte più debole. Per il precedente calcolo, si prende come modello il campo magnetico generato da una singola spira. All'interno della struttura muraria, invece, correnti indotte nei canali capillari vengono generate secondo il principio dell'induzione elettromagnetica e possono propagare linearmente per molti metri di distanza dal dispositivo. Pertanto i dispositivi Ecodry devono necessariamente essere posizionati a contatto diretto con la muratura o nell'immediata prossimità.

Nessun pericolo per esseri viventi o strutture organiche:

A causa delle deboli onde elettromagnetiche emesse e il damping del campo elettromagnetico in aria, non si verifica **nessuna interazione nociva per esseri viventi** o strutture organiche.

Il materiale murario non viene asciugato/seccato:

La tecnologia Ecodry indebolisce le forze di risalita, **contrastando l'umidità in eccesso** che dinamicamente tende a salire nella struttura muraria. In assenza di forze di risalita, il materiale murario contiene una percentuale fisiologica di acqua, tipicamente $\leq 3-4\%$, che è molto importante per la funzionalità del materiale stesso. Questa quantità naturale d'acqua, che non è prodotta da forze di risalita ma è già presente nel materiale, non viene minimamente intaccata dalla tecnologia Ecodry.

Decorso dei sali nel processo di deumidificazione:

Nel processo di deumidificazione di una struttura muraria ammalorata, la tecnologia Ecodry blocca la salita dell'acqua e fa sì che l'umidità in eccesso nella struttura muraria torni nel terreno. Tuttavia, i sali precedentemente cristallizzati nel muro non possono essere eliminati in questo modo e devono essere trattati in maniera specifica. Spesso, il processo di

deumidificazione porta i sali in superficie. In quest'ottica, durante il funzionamento dei dispositivi Ecodry la comparsa di efflorescenze deve essere interpretato come un segno positivo di iniziale *guarigione* del muro. Tali efflorescenze possono essere rimosse con tecnologie apposite.

CONCLUSIONI

Possiamo ricapitolare quanto esposto in questo documento con alcuni messaggi chiave:

- L'umidità di risalita è un problema complesso e del tutto naturale.
- La risalita dell'acqua trasporta elementi chimici che reagiscono con quelli già presenti nel muro: formazione di sali. I sali sono il vero pericolo, a causa delle loro proprietà di idratazione e cristallizzazione.
- Le proprietà dell'acqua innescano la risalita tramite tre meccanismi: capillarità, osmosi, differenza di potenziale elettrico.
- La tecnologia Ecodry, a differenza dell'edilizia tradizionale, agisce direttamente sull'**acqua** e non sul muro, combattendo così le **cause** e non i sintomi.
- La tecnologia Ecodry si basa su un dispositivo che emette **onde elettromagnetiche a frequenza estremamente bassa** (nell'ordine dei 100 Hz). Quando viene esposto a queste basse frequenze, il reticolo di molecole d'acqua nel muro tende a deformarsi e indebolirsi.
- Così la tecnologia Ecodry, in modo del tutto non invasivo, **toglie all'acqua la sua capacità di arrampicarsi nel muro**, indebolendo le tre forze di risalita.
- Le apparecchiature Ecodry sono assolutamente ecocompatibili, non rappresentano una fonte di inquinamento elettromagnetico, non sono invasive, hanno consumi irrisori, rimuovono solo l'umidità in eccesso e non la quantità fisiologica d'acqua che è sana per la funzionalità del materiale murario.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Evelyn J. Freney, Scot T. Martin and Peter R. Buseck, *Deliquescence and Efflorescence of Potassium Salts Relevant to Biomass-Burning Aerosol Particles*, *Aerosol Science and Technology*, **43**, 799-807 (2009). <https://doi.org/10.1080/02786820902946620>.
- [2] Raphael A. J. Wüst and Christian Schlüchter, *The Origin of Soluble Salts in Rocks of the Thebes Mountains, Egypt: The Damage Potential to Ancient Egyptian Wall Art*, *Journal of Archaeological Science* **27**, 1161-1172 (2000). <https://doi.org/10.1006/jasc.1999.0550>.
- [3] J. Desarnaud, D. Bonn & N. Shahidzadeh, *The Pressure induced by salt crystallization in confinement*, *Scientific Reports* **6**, 30856 (2016). <https://doi.org/10.1038/srep30856>.
- [4] A. Angulo-Sherman, H. Mercado-Urbe, *Dielectric spectroscopy of water at low frequencies: The existence of an isopermitive point*, *Chemical Physics Letters* **503**, 327-330 (2011). <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2011.01.027>.