

Patrocini richiesti |  
Required sponsorships



# MATERA 2019

4 e 5 Aprile 2019 | Auditorium R. Gervasio



## TECNOLOGIE PER IL RECUPERO DEL COSTRUITO Umidità nelle costruzioni: diagnosi e metodi di intervento. Dal Taglio Meccanico alla Tecnica a Neutralizzazione di Carica

*TECHNOLOGIES FOR THE RECOVERY OF BUILT HERITAGE.  
Capillary rising damp: diagnosis and methods of intervention.  
From the physical barriers to the Charge Neutralization Technique*

# ATTI DEL CONVEGNO

## CNT-APPs | CHARGE NEUTRALIZATION TECHNOLOGY Research Project | Applications

Partenariato universitario | Academic partnership.



Università della Basilicata



Università di Ferrara



Università di Napoli



Università di Padova



Università del Salento



Polltecnico di Torino

Altri Enti patrocinanti | Other sponsoring bodies.



A. B. A. C. O.  
Ambiente Benessere Architettura Cultura Opportunità



Associazione Italiana Esperti Scientifici



In collaborazione con | in collaboration with.



Collegio Geometri e Geometri Laureati  
Provincia di Matera



COLLEGIO DEI PERITI INDUSTRIALI E DEI PERITI INDUSTRIALI LAUREATI DELLA PROVINCIA DI MATERA

LUCIANO Editore

## COMITATO SCIENTIFICO | SCIENTIFIC COMMITTEE

**Raymond Bondin** (Ambasciatore Emerito di Malta presso UNESCO)

**Mercedes Del Rio Merino** (Universidad Politécnica de Madrid)

**Antonella Guida** (Università degli Studi della Basilicata)

**Antonello Pagliuca** (Università degli Studi della Basilicata)

**Nicola Cardinale** (Università degli Studi della Basilicata)

**Antonio Bixio** (Università degli Studi della Basilicata)

**Antonio Conte** (Università degli Studi della Basilicata)

**Graziella Bernardo** (Università degli Studi della Basilicata)

**Michele D'Amato** (Università degli Studi della Basilicata)

**Nicola Masini** (Università degli Studi della Basilicata)

**Manlio Montuori** (Università di Ferrara)

**Roberto Castelluccio** (Università di Napoli Federico II)

**Claudio Modena** (Università di Padova)

**Paolo Maria Congedo** (Università del Salento - Lecce)

**Carlo Ostorero** (Politecnico di Torino)

**Giorgio Zavarise** (Politecnico di Torino)

Tutti i diritti riservati.

Vietata la riproduzione anche in parte.

© 2019 by LUCIANO EDITORE

Via P. Francesco Denza, 7

80138 Napoli

<http://www.lucianoeditore.net>

e-mail: [editoreluciano@libero.it](mailto:editoreluciano@libero.it)

ISBN 978-88-6026-270-7

Stampa: [www.darcoprint.it](http://www.darcoprint.it)

# **Sali igroscopici ed umidità da risalita capillare nell'esperienza di palazzo Renata di Francia in Ferrara: soluzione d'intervento mediante tecnologia a neutralizzazione di carica**

Manlio Montuori<sup>1</sup>

*<sup>1</sup>Labo.R.A. – Laboratorio di Restauro Architettonico del Dipartimento di Architettura dell'Università degli Studi di Ferrara % TekneHub, Tecnopolo dell'Università degli Studi di Ferrara – Ferrara*

manlio.montuori@unife.it

## **Sommario:**

L'azione deteriorogena dovuta alla presenza di formazioni saline nelle murature può influire in modo significativo sul ciclo di vita del patrimonio edilizio, sia storico che contemporaneo. In questo articolo, vengono analizzati i vari meccanismi di danno ai materiali da costruzione indotti dalla migrazione dei sali nelle murature che compongono l'isolato ferrarese di via Savonarola, già via di San Francesco, sede del Rettorato dell'ateneo ferrarese. Viene discussa anche l'importanza delle indagini pertinenti la caratterizzazione che, in combinazione con la conoscenza dei meccanismi di trasporto dei sali e dell'umidità, può dare indicazioni utili sulle opzioni di trattamento preventive o contemporanee all'azione di neutralizzazione dell'umidità da risalita per capillarità mediante la tecnologia a neutralizzazione di carica. Proprio la presenza dell'umidità di risalita per capillarità è un'altra causa delle patologie che affliggono, nello specifico, l'edilizia specialistica che insiste su via Savonarola e che è resa ancora più grave proprio per la presenza dei contaminanti salini. Vengono quindi valutati i metodi di trattamento del danno da sali, comprese le tecniche passive basate sul controllo ambientale, la riduzione del trasporto dell'acqua o la conversione a sali meno solubili e le procedure attive che portano alla rimozione di sali dalle zone di deterioramento. In conclusione, si illustra l'articolata procedura messa in atto dal Laboratorio di Restauro Architettonico (Labo.R.A.) con il partner tecnologico Leonardo Solutions – Domodry, di concerto con il personale dell'area tecnica dell'ateneo ferrarese e sotto l'alta sorveglianza della Soprintendenza Archeologia, Belle Arti e Paesaggio per la Città di Bologna e le Province di Modena, Reggio Emilia e Ferrara, Unità Tecnica territoriale di Ferrara, consistita nell'installazione di un primo dispositivo CNT (acronimo di: Charge Neutralization Technology, Tecnologia a Neutralizzazione di Carica) contemporaneamente ad un sistema di ventilazione igroregolato al basamento presso la sala degli ermellini.

## **1. Introduzione**

Il danno indotto dalla migrazione dei sali rappresenta uno dei più significativi problemi che affliggono il patrimonio storico costruito. Oltre ai meccanismi di danno come le variazioni di temperatura, le azioni meccaniche di erosione causate dal vento e dal ruscellamento delle acque meteoriche o i cambiamenti di fase del contenuto umido presente nelle murature, i danni indotti dai sali possono avere natura sia chimica che fisica [1] che aumenta l'effetto deteriorogeno e, di conseguenza, l'impatto sullo stato di conservazione e quindi sul ciclo di vita materiali e componenti che, nel caso del patrimonio culturale

costruito, sono ancora più sensibili perché meno pronti ad interventi invasivi, come la rimozione e la sostituzione, che pregiudicherebbero il valore testimoniale di quella cultura materiale di cui le tecniche costruttive storiche sono espressione, fino a comprometterne l'autenticità materica. La penetrazione dei sali solubili nelle strutture di elevazione avviene secondo differenti processi di migrazione e, successivamente, il contenuto umido delle membrature è il vettore che ne determina il trasporto; pertanto, la comprensione dei processi di trasporto dell'umidità nei materiali porosi da costruzione è essenziale per prevenire danni indotti dai contaminanti salini.

Il presente contributo, focalizzando l'attenzione sulle cause ed i meccanismi deteriorogeni indotto dai sali rilevati presso palazzo Renata di Francia, ha l'obiettivo di dare una risposta operativa ai quesiti formulati di seguito. In primo luogo, al variare dei tipi litoidi adottati nelle differenti fasi costruttive, quali sono le regioni più vulnerabili all'azione dei sali e, tra quelli identificati *in situ*, quali sono i contaminanti più dannosi. Le manifestazioni di degrado nelle murature settentrionali, verso Parco Pareschi (Fig. 1), risentono degli effetti causati da azioni relativamente isolate, come il rapido raffreddamento, oppure da stress accumulatisi nel tempo, come l'azione ciclica gelo-disgelo? Per l'attuale stato di conservazione dei materiali, qual è il contributo offerto dai differenti presidi posti a contrastare l'umidità ascensionale nelle murature? In fine, a seguito dell'installazione del dispositivo pilota CNT® di Domodry [2], quali sono gli effetti a medio termine nei riguardi del danno da sali e qual è il contributo dell'impianto di ventilazione igroregolato anche in vista di un potenziamento dell'azione preventiva mediante la promettente combinazione delle due tecnologie?



Fig.1  
Ferrara, Palazzo Renata di  
Francia: il fronte esposto a  
Nord su Parco Pareschi  
*Ferrara, Renée of France  
palace: the northern front  
facing Parco Pareschi*

## 2. Il progetto pilota presso la sala degli ermellini di Palazzo Renata di Francia

L'isolato di via Savonarola a Ferrara è il centro più rappresentativo dell'ateneo ferrarese, ospitando il Rettorato, alcune segreterie per gli studenti, ed il Dipartimento di Studi Umanistici; tuttavia, a seguito della sequenza sismica del Maggio 2012 è stato necessario allontanare il personale amministrativo, gli studenti ed il corpo docenti dai locali a causa degli ingenti danni riportati. L'evento, da tragico qual è stato, si è trasformato nell'occasione per porre rimedio ad una serie di problematiche sulle quali sono andate a sovrapporsi le



offese inferte dal sisma. Nell'attesa di avviare le attività di restauro e consolidamento, si è deciso di impiantare un cantiere pilota in palazzo Renata di Francia per acquisire un quadro conoscitivo, il più ampio possibile, del contesto su cui si andrà ad operare, ponendo particolare attenzione alla caratterizzazione dei sali igroscopici che rappresentano un problema severo ulteriormente accentuato dalla presenza nelle murature dell'umidità da risalita capillare. Infatti, oltre ai processi di degrado innescati dalle repentine alterazioni del gradiente termico, dagli effetti erosivi esercitati dalle azioni meccaniche di vento e acqua, e dai cambiamenti di fase della stessa acqua, il danno indotto dalla presenza dei sali solubili, sia di tipo chimico sia di natura fisica, tende ad estendersi grazie ai processi di migrazione di cui è responsabile l'umidità. Dalla neutralizzazione di quest'ultima è possibile ridurre drasticamente l'effetto di danno causato dalle patologie di degrado e, pertanto, è stata sviluppata una prima azione di contrasto alla risalita dell'umidità per capillarità nelle murature d'ambito della sala degli ermellini, la più sensibile ai fenomeni deteriorogeni per la presenza delle toghe e delle stole in ermellino indossate dal personale docente dell'ateneo ferrarese nel corso di eventi e cerimonie ufficiali.

A tal fine, sarà efficace l'illustrazione del metodo adottato, presentando dettagliatamente i dati della campagna diagnostica per discutere i risultati dell'azione di asciugamento.



Fig.2  
Ferrara, Palazzo Renata di Francia: il fronte esposto a Sud della corte interna

*Ferrara, Renée of France palace: the southern front of the inner court*



Fig. 3  
Ferrara, Palazzo Renata di Francia: la doppia loggia dell'ala Nord prospiciente la sala degli ermellini

*Ferrara, Renée of France palace: the two-faced loggia of the north wing facing the sala degli ermellini*

## 2.1 Approccio metodologico

Il processo sperimentale ha adottato un metodo consolidato di analisi della consistenza materica delle murature indagate per documentare gli specifici interventi succedutisi nel tempo e caratterizzarne lo stato di conservazione.

Ubicato lungo il margine settentrionale dell'impianto urbano medievale, in prossimità della cinta muraria che a partire dal 1492 sarà demolita per dare l'avvio all'ambizioso piano di espansione fondiaria dell'addizione Erculea, l'organismo architettonico di palazzo Renata di Francia dimostra tutta la sua complessità presentando significative redazioni architettoniche che stratificandosi hanno definito l'attuale impianto: il complesso, disposto su due livelli, è organizzato attorno ad una corte centrale (Fig. 2) che, sul lato settentrionale, si apre attraverso una doppia loggia passante (Fig. 3) verso Parco Pareschi, precedentemente pertinenza del palazzo [3]. L'area indagata, attestata in direzione settentrionale verso il giardino, evidenzia come nel tempo si sia tentato di porre rimedio all'azione deteriorogena dell'umidità ascendente con un ampio spettro di soluzioni tecniche, risultando sempre poco efficaci nella risoluzione delle criticità. Il palazzo, infatti, acquistato dal Comune di Ferrara nel 1942, nel 1959 passò in uso perpetuo e gratuito all'Ateneo ferrarese che affidò a Piero Bottoni la complessa opera di recupero, nel 1963. A questa fase sono riconducibili gli interventi che hanno fatto ricorso al taglio meccanico delle murature ed alla predisposizione dei sifoni Knapen, mentre in corrispondenza delle murature rivestite d'intonaco si è fatto ampio uso di legante cementizio.

## 2.2 Interventi ed insuccessi nella mitigazione dell'umidità da risalita capillare

Per comprendere lo stato di conservazione delle murature indagate, è indispensabile valutare gli interventi predisposti e documentare come gli insuccessi abbiano contribuito al progredire delle condizioni di degrado.

Una prima strategia adottata è stata quella di incrementare la ventilazione all'interno dello spessore murario, al fine di accelerare la deumidificazione, praticando una serie di fori lungo il piede della muratura ed ad una distanza opportuna da proteggere le cavità dal rimbalzo delle acque meteoriche. Questo principio è alla base dell'installazione dei sifoni Knapen (Fig. 5) che, favoriti da un diffuso successo commerciale, tuttavia hanno dimostrato la loro inefficacia nell'assicurare il processo di asciugatura delle murature [4,5]. Infatti, basato sull'idea che predisponendo nella muratura dei fori di ventilazione per la posa di tubi cavi, i quali –come dei sifoni– allontanano il contenuto umido dalle pareti rilasciandolo all'atmosfera, il fronte di risalita si abbasserà in relazione all'intensità ascensionale dell'acqua (che dovrebbe essere bassa) e alla velocità di evaporazione assicurata dal sifone (che dovrebbe essere maggiore). Realizzati in materiale permeabile –nel caso studio è stato identificato l'uso di almeno due tipologie di sifoni, in argilla cotta ed in materiale plastico– i sifoni sono alloggiati in perfori orizzontali, al contrario di quanto prescritto nel brevetto di Achille Knapen che prevedeva il calcolo di un preciso angolo per la predisposizione di fori inclinati verso l'alto (cfr.: registrazione depositata il 23 Febbraio 1909 presso il *Canadian Patent Office Record and Register of Copyrights*). Se l'idea dell'ingegnere belga era sostenuta dall'ipotesi che il contenuto umido di una muratura possa essere catturato dal “sifone atmosferico” in terracotta e, penetrando attraverso le sue pareti porose, aumenti il tasso di umidità dell'aria secca proveniente dal sifone fino a raffreddarsi

e diventare più densa, così da diffondersi naturalmente evaporando verso l'esterno; tuttavia nella realtà assistiamo a ben altro comportamento. Nella comunicazione presentata alla Royal Society of Health [6] appare evidente come il successo del sifone atmosferico sia assicurato –in teoria– dall'aria che, penetrando nel sifone, si troverà in uno stato di equilibrio instabile, così da favorire una permanente circolazione fino a quando il differenziale termico e igrometrico non si sarà annullato. Tuttavia, questo comportamento non è propriamente in linea con quanto accade

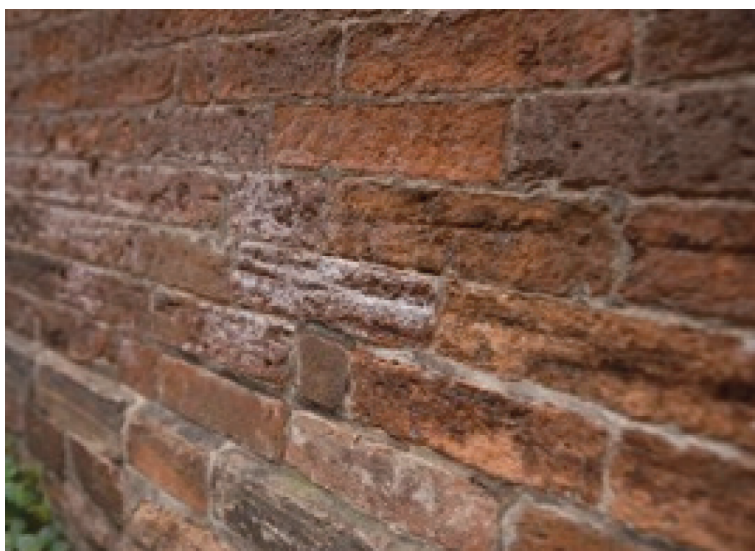


Fig. 4  
Le murature esterne della sala degli ermellini: presenza di efflorescenze saline  
*The external walls of the sala degli ermellini: manifestation of salt efflorescences*

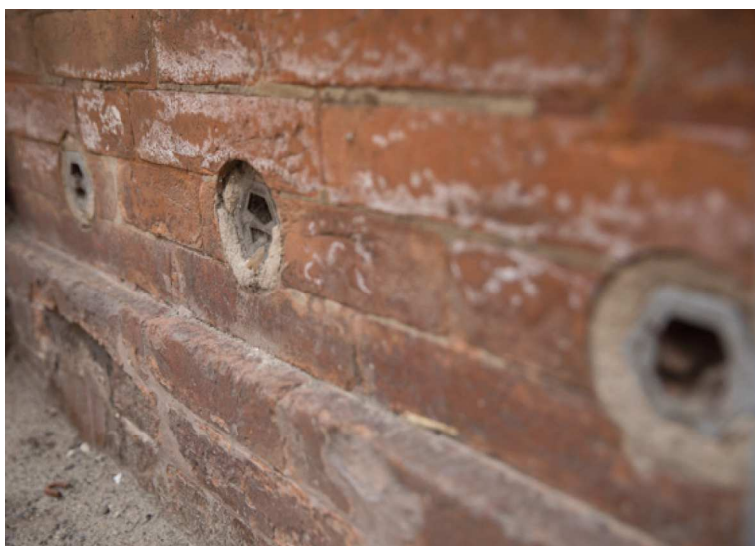


Fig. 5  
Le murature esterne della sala degli ermellini: fallimentare installazione dei sifoni Knapen  
*The external walls of the sala degli ermellini: the failure of the Knapen siphons system*





Fig. 6

Le murature esterne della sala degli ermellini: l'insuccesso della barriera meccanica

*The external walls of the sala degli ermellini: the failure of the damp-proof physical barrier*



Fig. 7

Barriera meccanica e leffetto ponte dei rivestimenti (interni ed esterni) in malta cementizia

*Bridging the damp-proof physical barrier by the cement rendering (external) and plastering (internal)*

nella realtà, dove l'aria esterna è sempre in movimento, così da dare luogo a turbolenze attorno alle pareti che, producendo un continuo scambio d'aria nel sifone, non favoriscono l'attivazione del processo. Inoltre, assunta per corretta la teoria proposta da Knapen e nell'ipotesi di perfori praticati verso l'alto, se la temperatura delle murature è maggiore dell'aria, allora la sacca d'aria formatasi all'interno del sifone rimarrebbe intrappolata perché più leggera; di contro, se la parete è ad una temperatura inferiore rispetto all'aria, l'aria interna potrebbe stagnare verso il basso e, nel caso in cui la temperatura della parete scenda sotto il punto di rugiada, allora si produrrebbe l'ancora più dannosa condensa interstiziale. È superfluo dire come l'eventuale inversione del perforo, ovvero dall'alto verso l'alto, risulterebbe ulteriormente critico, ad esempio, in presenza di pioggia battente per stravento che ruscella lungo le murature.

In fine, non va taciuto che, in relazione al materiale impiegato nell'apparecchiare le murature, più sottili saranno i micropori costitutivi e maggiore sarà l'attrazione ascensionale per capillarità, comportando che il contenuto umido nel materiale resti sostanzialmente



stabile e, soprattutto, non si osservi un'asciugatura percepibile. Inoltre, qualsiasi evaporazione lungo la superficie dei sifoni provoca un accumulo di sali disciolti in prossimità dei perfori, ben evidente nel caso studio in Fig. 5, che attira l'umidità dall'aria e, incrementando l'umidità della parete, attiva un circolo vizioso che amplifica gli effetti deteriorogeni causati dall'accumulo di contaminanti salini.

L'area del caso studio, sebbene non del tutto marginale all'impianto del palazzo, nel tempo, è stata interessata anche da un secondo metodo d'intervento per l'interruzione della risalita per capillarità dell'umidità, e cioè il taglio meccanico delle murature, favorendo così la possibilità di confrontare, a parità di condizioni, gli esiti di due tra gli interventi più invasivi sul patrimonio storico costruito e di compararne l'impatto sul comportamento generale. Perfezionato da Giovanni Massari e suo figlio Ippolito [7], lo sbarramento orizzontale alla risalita capillare riprende la tecnica costruttiva tipica in area padana che prevede il ricorso ad un cordolo lapideo a bassa porosità posto alla base delle murature (solitamente una roccia calcarea come la pietra d'Istria) destinato ad ostacolare interrompendo il moto ascensionale dell'umidità. Tuttavia, nel caso di specie, assistiamo ad

Tuttavia, nel caso di specie (Fig. 6), assistiamo ad una installazione che è informata alla soluzione proposta da Nicola Cavalieri San-Bartolo che, risultando meno invasiva rispetto al metodo Massari, predispone un foglio in polietilene goffrato pesante al posto della lastrina in piombo suggerita nell'Ottocento dall'ingegnere pontificio [8]. Sebbene l'interruzione meccanica sia il metodo più efficace e teoricamente reversibile, tuttavia l'intervento è stato bandito dal cantiere pertinente il patrimonio storico costruito non solo perché altera il comportamento della preesistenza alle azioni orizzontali introducendo una nuova vulnerabilità della struttura resistente, ma anche perché l'affidabilità dell'intervento può risentire della mancata attenzione nell'operatività del cantiere, destinata a garantire che la barriera non sia danneggiata nella posa in opera e sia predisposta a formare lo sbarramento lungo tutta la sezione muraria, non sempre praticabile. A questi aspetti negativi di carattere generale, nel caso di studio, si deve aggiungere la constatazione che nell'esecuzione del taglio della muratura, al di sopra del lembo suturato, si sono prodotte delle fratture successivamente sigillate con una malta cementizia. Inoltre, nel predisporre gli intonaci all'interno, non si è avuta l'accortezza di limitare il rivestimento fino al bordo superiore della barriera; di fatto, invece, lo strato di finitura ha costituito un ponte che ha favorito un nuovo percorso ascensionale all'acqua, quasi completamente satura di sali, contenuta nella porzione di muratura posta sotto la barriera (Fig. 7).

### *2.3 Contaminanti salini*

L'assorbimento dell'umidità nei materiali storici da costruzione può contribuire ad un aumento rilevante di volume e questo, soprattutto per quei materiali di natura argillosa, ingenera rigonfiamenti e distacchi particolarmente dannosi nel ciclo di gelo/disgelo. L'aumento del contenuto umido nelle murature contribuisce, in modo significativo, alla riduzione delle proprietà meccaniche dei materiali da costruzione impiegati e, non ultimo, influisce anche sul trasporto di energia alterandone la conduttività termica. Inoltre, l'azione deteriorogena dell'acqua può giungere fino alla solubilizzazione, fungendo come un solvente per quei componenti che si prestano ad essere dilavati (fenomeno osservato nelle regioni dove più si raccoglie una grande quantità di acqua come al disotto dei bancali delle finestre).

Queste manifestazioni di degrado sono ulteriormente gravate dalla presenza dei sali in soluzione nell'umidità di risalita che ne riduce significativamente il punto di congelamento; di contro, la combinazione di temperature elevate, alto tasso di umidità delle murature e sali solubili può creare le condizioni per un'aggressione di tipo biologico ai materiali da costruzione impiegati.

Per questo motivo, comprendere la natura dei contaminanti salini ed i problemi causati dalla loro cristallizzazione sulla muratura è indispensabile alla caratterizzazione delle vulnerabilità cui i laterizi e le malte impiegate, nel caso studio, sono esposti. In primo luogo, le fonti di ingresso dei contaminanti salini nelle murature possono essere di diversa natura: dall'inquinamento atmosferico, alle reazioni chimiche generate dalla decomposizione di agenti organici [9], agli incongrui interventi che fanno ricorso a leganti cementizi per le malte. Solfati, solfiti, nitrati e nitriti tipicamente provengono dall'azione deteriorogena degli inquinanti atmosferici urbani [10], mentre la presenza dei nitrati è legata alle deiezioni di volatili. I cloruri rappresentano il tipico indicatore in area marina che può penetrare nelle murature per risalita capillare, ma anche mediante l'applicazione di sali di sbrinamento per la manutenzione delle strade, come nel caso del marciapiede posto all'esterno della sala degli ermellini. Inoltre, la formazione dei sali può avvenire a seguito di reazioni acide come nel caso dell'anidride solforosa  $SO_2$  che, disciolta in acqua, forma acido solforoso  $H_2SO_3$  e anidride solforica  $SO_3$ , due acidi che decompongono la calce e gli aggregati ad esso miscelati per la formazione dei rivestimenti, con conseguente formazione di gesso [11]. Invece, l'acido nitrico, originato dall'ossidazione dell'azoto nei processi di combustione o dall'ammoniaca contenuti nell'atmosfera, contribuisce alla decomposizione del carbonato di calcio, formando nitrato di calcio sulle superfici. In fine, i silicati e gli alluminati di calcio formati dall'idratazione dei leganti cementizi possono reagire con l'acqua e il gesso o con i sali di solfato, formando taumasite ed ettringite [12]. Questi sali rappresentano una vulnerabilità per le murature storiche perché sono solubili e possono dissolversi e ricristallizzarsi, spesso all'interno dei pori del materiale nel punto di evaporazione, inoltre, ogni sale si distingue per un differente grado di solubilità che comporta un comportamento differente in un ambiente umido. Mentre alcuni sono in grado di assorbire l'acqua dall'aria, cambiando la propria struttura a causa dell'idratazione o della disidratazione (ad esempio, il solfato di sodio può mutare in thenardite o mirabilite secondo il suo stato di idratazione), invece altri sali possono dissolversi nell'acqua che hanno assorbito dall'aria, attraverso la deliquescenza (come è il caso della salgemma). Quindi, le condizioni ambientali circostanti e all'interno del soggetto indagato influenzano il comportamento dei differenti materiali, ciascuno dei quali presenterà livelli diversi di vulnerabilità a tali condizioni ambientali, a seconda della natura della sua porosità e permeabilità, e della composizione chimica dei suoi costituenti. Questi fattori influenzano la predisposizione con cui l'acqua, contenente sali in soluzione, può penetrare nella muratura e, soprattutto, il modo in cui può interagire fisicamente e chimicamente con i materiali da costruzione. L'azione deteriorogena causata dai contaminanti salini avviene per cristallizzazione o per precipitazione del sale, manifestandosi sotto forma di efflorescenza che ridimensiona la struttura aggredita mediante scagliatura, disgregazione (polverizzazione o arenizzazione), oppure alveolizzazione. Il danno è causato dalle transizioni della componente salina nel passaggio di stato dell'umidità: il sale disciolto e trasportato dal vettore acqua si deposita quando il liquido supersaturo evapora –condizione favorita in materiali con elevata porosità– poiché i sali non possono essere trasportati in fase gassosa.

Solo di rado è presente un solo contaminante salino, mentre solitamente si registra la presenza di due o più sali e, tra questi, quelli meno solubili precipiteranno per primi –in prossimità del punto di ingresso dell’acqua vicino al suolo– laddove i più solubili vengono richiamati in alto per mezzo del moto ascensionale favorito dalla capillarità del materiale. Infatti, l’acqua attraversando il suolo acquisisce gli ioni più comuni, ovvero i cationi sodio ( $\text{Na}^+$ ), potassio ( $\text{K}^+$ ), magnesio ( $\text{Mg}^{++}$ ) e calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ); e gli anioni cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), solfato ( $\text{SO}_4^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e bicarbonato, ( $\text{HCO}_3^-$ ). I sali più insolubili si formeranno vicino al suolo; è il caso del carbonato di calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) e del solfato di calcio biidrato ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) che, visivamente, si manifestano come film biancastri oppure sotto forma di croste. In seguito, la soluzione satura continua a migrare verso l’alto e, arricchendosi di altri ioni, con l’evaporazione continua altri sali si cristallizzano, come il solfato di magnesio eptaidrato ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ). Allo stesso modo, il solfato di sodio può cristallizzare come mirabilite decaidrato ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) o thenardite anidra ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), se la temperatura al momento della cristallizzazione è superiore a  $32,4^\circ\text{C}$  o con una bassa umidità relativa. Anche questi sali tendono a manifestarsi formando efflorescenze che andranno a collocarsi in regioni poste al di sopra di quelle dove si depositano i sali più insolubili.

I cloruri e i nitrati sono i sali più solubili e saranno quindi gli ultimi a cristallizzarsi, come i sali alcalini: il cloruro di sodio ( $\text{NaCl}$ ), il nitrato di potassio ( $\text{KNO}_3$ ), e il nitrato di sodio ( $\text{NaNO}_3$ ). I cloruri e nitrati di metalli alcalini terrosi, come ad esempio il cloruro di calcio usato come sale sbrinante, essendo più solubili e igroscopici, non si cristallizzano quasi mai, ma mantengono le aree contaminate sempre umide. Infine, è importante ricordare che i sali meno solubili, come gesso e calcite, avranno una solubilità significativamente maggiore in presenza di sali come  $\text{NaCl}$  o  $\text{KCl}$ , cioè sali che non hanno uno ione comune con essi.

Per questo motivo, questi sali che, in linea di principio, dovrebbero cristallizzare principalmente nelle parti inferiori delle murature, sono stati rilevati in efflorescenze a diversi metri di altezza nel caso studio; a questo, inoltre, bisogna aggiungere che l’efflorescenza può essere rientrata nella struttura dei pori quando bagnata dalle acque meteoriche, con conseguente redistribuzione dei sali e delle loro concentrazioni a diverse profondità e altezze delle murature.

Al fine di caratterizzare la componente relativa ai contaminanti salini, si è provveduto a prelevare dei campioni lungo le murature della sala degli ermellini, selezionando campioni di laterizi prelevati all’esterno perché maggiormente rappresentativi della dominante attraverso la quale l’umidità si manifesta. Le attrezzature ed i materiali impiegati per il prelievo dei campioni includono un trapano a batteria regolazione elettronica del numero di giri con l’esclusione della percussione, una punta carburi metallici sinterizzati ad alte temperature da 6 mm, provette in vetro trasparente con tappo a chiusura ermetica, un supporto in plastica per la raccolta della polvere, e le etichette per la classificazione dei differenti campioni. Sono stati prelevati tre diversi campioni di laterizio in due differenti punti rappresentativi dello stato di conservazione del paramento esterno, con intervalli di 300 mm fino all’altezza stimata del fronte di risalita (ovvero 300 mm, 600 mm e 900 mm) per fornire informazioni sulle distribuzioni di sali solubili in acqua nelle pareti. Per completezza, inoltre, sono stati raccolti campioni di laterizio aggiuntivi, per ciascun punto di prelievo, a circa 1,5 m sopra il fronte di risalita come termine di comparazione. Ciascun saggio campione è stato eseguito ad una profondità di 0–20 mm, 20–50 mm e 50–80 mm per ogni altezza. I campioni così predisposti sono stati analizzati presso il laboratorio



TekneHub del Tecnopolo di Ferrara mediante termogravimetria, per la caratterizzazione del contenuto umido (Fig. 8), e cromatografia ionica, per la definizione delle concentrazioni di anioni e cationi.

Il grafico illustra come, per tutti i campioni raccolti alle differenti profondità, il contenuto umido diminuisce all'aumentare dell'altezza, variando a secondo della profondità di prelievo.

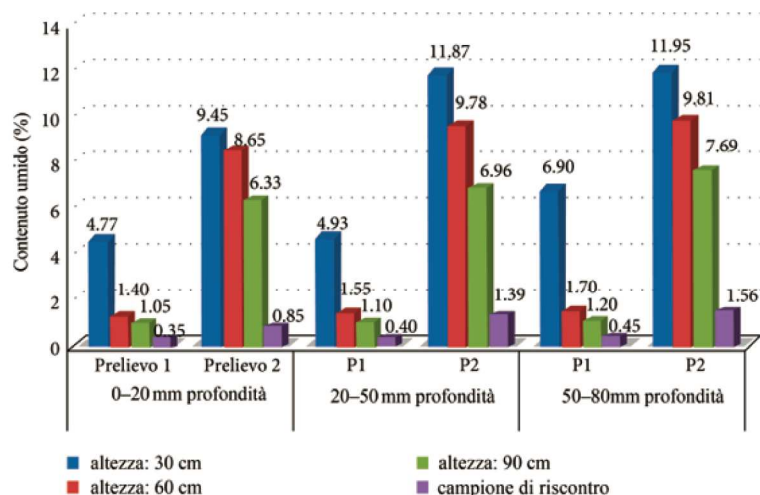


Fig. 8  
Caratterizzazione del contenuto umido a diverse altezze preventivo alla ricerca delle concentrazioni di anioni e cationi.

*Characterization of the water content at different heights for the research of anions and cations concentrations.*

Inoltre, i risultati mostrano che in corrispondenza del fronte di risalita la maggior parte dell'umidità contenuta nella muratura è evaporata, lasciando precipitare i sali a formare efflorescenze superficiali. Pertanto, la principale fonte che contribuisce all'aumento dell'umidità nelle murature è l'acqua da falda freatica, senza tacere del contributo fornito dalla mancata irreggimentazione delle acque meteoriche che, scaricando direttamente nel terreno vegetale del parco e non venendo allontanate, finiscono con il ristagnare al piede delle murature.

I risultati delle analisi riguardanti le concentrazioni degli ioni nei campioni di laterizio prelevati in due punti distinti sono presentati nelle Fig. 9. Alle varie profondità (0-20 mm, 20-50 mm e 50-80 mm) all'altezza di 900 mm,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$  e  $K^+$  sono stati identificati come cationi predominanti, mentre  $SO_4^{2-}$  e  $Cl^-$  come gli anioni predominanti.

Il solfato di magnesio ( $MgSO_4^{2-}$ ), il cloruro di magnesio ( $MgCl_2$ ), il solfato di sodio ( $Na_2SO_4$ ), il cloruro di sodio ( $NaCl$ ), il solfato di potassio ( $K_2SO_4$ ) e il cloruro di potassio ( $KCl$ ) sono i sali maggiormente presenti all'altezza massima di prelievo in concentrazioni che possono causare danni alle murature interessate, superando la soglia di sicurezza dello 0,020% [13]. Sebbene tutti i sali identificati nel presente studio possano essere dannosi,  $Na_2SO_4$ ,  $MgSO_4$  e  $MgCl_2$  sono i più nocivi, in quanto capaci di provocare un deterioramento più esteso del supporto litoide rispetto a tutti gli altri sali presenti [14].

In fine, i risultati confermano che la maggior parte dei sali si concentri sulla superficie esterna della muratura, ad una profondità compresa tra 0 e 20 mm, dimostrando come la cristallizzazione si manifesti maggiormente in prossimità del fronte di risalita.

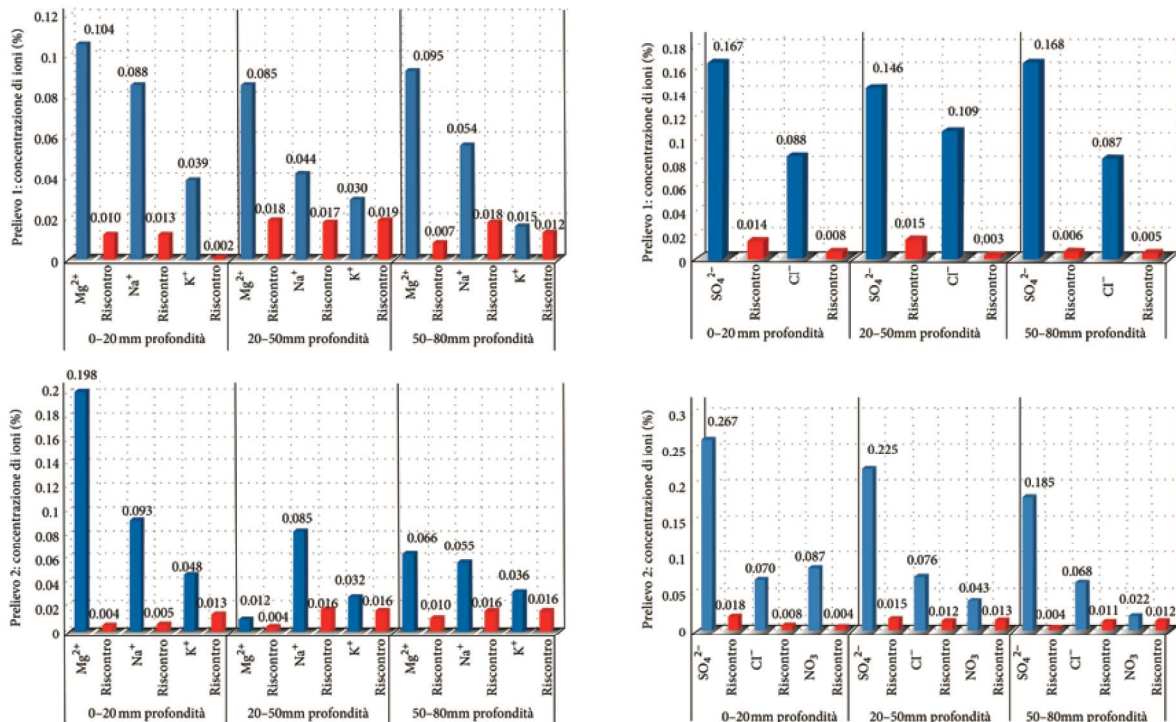


Fig. 9

Comparazione delle concentrazioni di ioni cationi (a sinistra) ed anioni (a destra) presenti nei saggi P1 e P2 prelevati ad un'altezza di 900mm, sotto il fronte di risalita, della muratura campionata di Palazzo Renata di Francia esposto a Nord su Parco Pareschi.

*Comparison of the ions concentrations, cations on the left and anions on the right, showed by the samples P1 and P2 taken at heights of 900mm, below the rising damp edge, from the tested masonry of Palazzo Renata di Francia, exposed to the North toward Parco Pareschi.*

### 3. La neutralizzazione della risalita umida per capillarità

Prevenire le manifestazioni di degrado causate dai sali solubili e, soprattutto, agire in modo proattivo per contrastare la loro formazione richiedono soluzioni variabili a seconda delle condizioni caratteristiche del soggetto indagato. Infatti, ciò che potrebbe essere efficace in un caso, potrebbe essere del tutto inadeguato in un'altra situazione poiché le variabili in campo sono influenzate, come visto precedentemente, dalle fonti di ingresso dell'umidità, dalla natura dei sali, e della natura eterogenea dei materiali da costruzione impiegati.

Una diagnosi accurata della patologia è di primaria importanza all'avvio di qualsiasi misura correttiva. I potenziali approcci per contrastare l'azione deteriorante causata dai contaminanti salini devono poter prevedere: il contrasto dell'ingresso dell'acqua e dei sali nelle murature; la rimozione di eventuali sali già presenti; la correzione delle condizioni ambientali al contorno per limitare i cicli dannosi di eventuali sali persistenti; e l'utilizzo di materiali noti essere meno vulnerabile all'attacco dei sali.

Pertanto, se il contrasto alla risalita capillare è la prima strategia da mettere in atto, allora la tecnologia che, più di altre, ha dimostrato di dare soluzione al problema in modo

efficace e definitivo, mantenendo i risultati nel tempo, è la tecnologia a neutralizzazione di carica CNT® [15-16]. Il cambio di paradigma offerto dalla tecnologia è sostanziale perché, ribaltando l'approccio rispetto ai metodi elettrofisici, aggredisce il problema della risalita dell'umidità per capillarità interrompendo l'azione elettrocinetica dello scambio ionico mobilitato dal doppio strato di Helmholtz lungo le superfici dei capillari.

Di concerto con l'Ufficio tecnico dell'Ateneo ferrarese si è deciso di installare un primo dispositivo LS-R06 di Domodry® all'interno della sala degli ermellini (Fig. 10) così da arrestare il moto ascensionale dell'umidità nelle murature e, una volta completata la fase di asciugatura, favorire le attività del cantiere di restauro e consolidamento per la riparazione dei danni causati dal sisma del Maggio 2012 ed il miglioramento del comportamento sismico di tutto l'insediamento universitario lungo via Savonarola. Al fine di documentare la fase di asciugatura si è adottato un protocollo, condiviso all'interno del Comitato Scientifico del protocollo di ricerca interuniversitario CNT-APPs di cui l'autore coordina le attività, che prevede l'identificazione dei punti di prelievo dei saggi campioni con il supporto di una campagna termografica. Il prelievo dei campioni ha fatto ricorso agli stessi mezzi d'opera e materiali precedentemente descritti, mentre si è scelto di analizzare con il metodo ponderale—in accordo con la norma UNI 11085:2003— solo i campioni di laterizio prelevati ad una profondità di 75–150mm, decidendo di rinunciare ai primi centimetri di materia prelevata per la presenza dell'intonaco e, soprattutto, perché in corrispondenza del fronte di evaporazione il campione può essere alterato dalla presenza dei contaminanti salini. Il campionamento (Tabella 1) è stato eseguito prima dell'installazione del dispositivo per avere un dato di comparazione al tempo zero e, successivamente, dopo sei mesi, dopo un anno, e dopo due anni per valutare il mantenimento del risultato raggiunto.

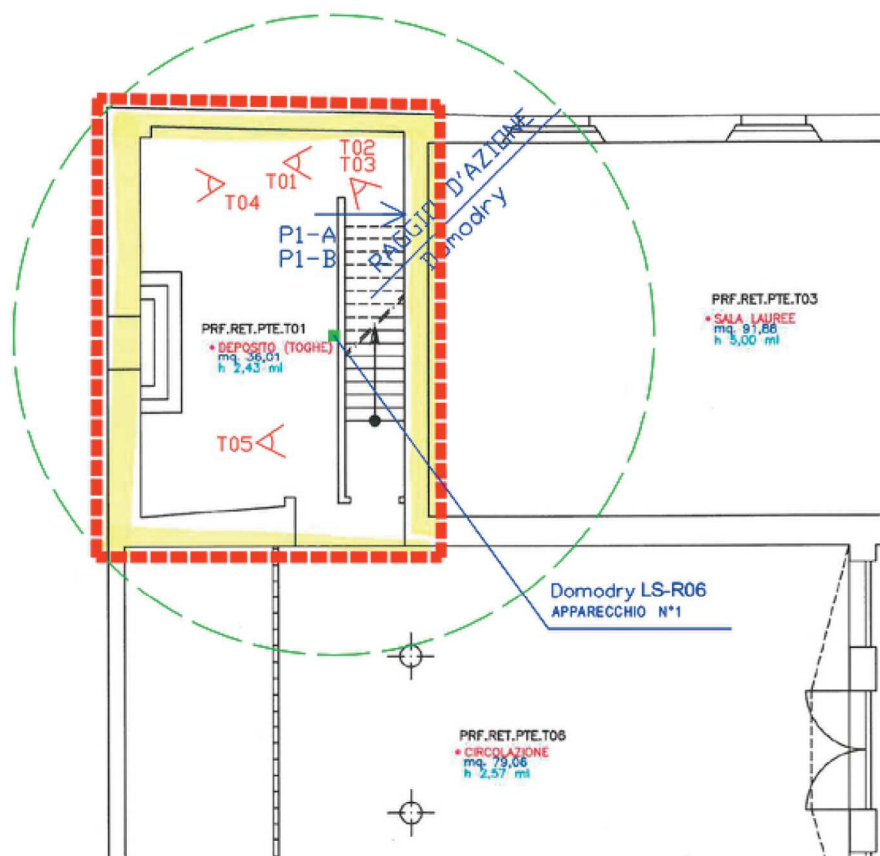


Fig. 10  
Piano di installazione del dispositivo Domodry® tipo LS-R06 con raggio d'azione 6 metri. Punto di prelievo dei saggi campione:

*Installation plan of the LS-R06 device by Domodry®, with a 6 meters action radius. Point of samples collection:*



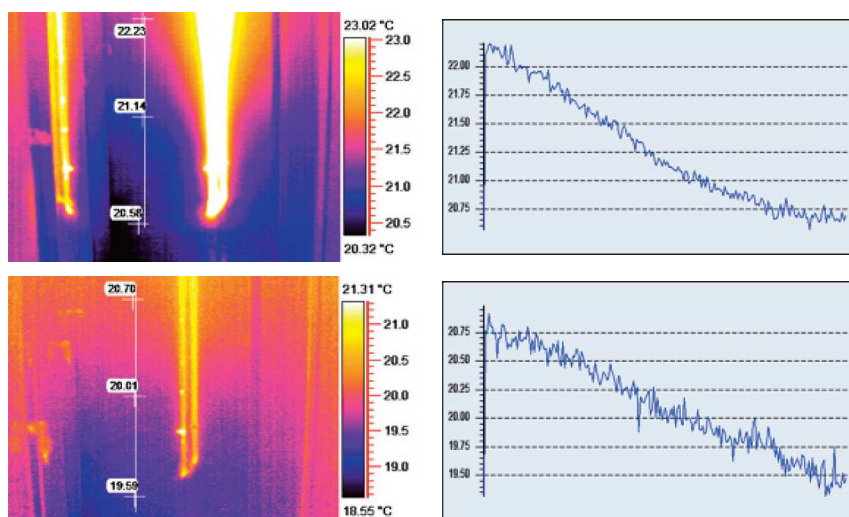


Fig. 11  
Punto di ripresa fotografica T01: misurazione dell'intensità di radiazione infrarossa emessa dalla muratura (a sinistra) e relativo profilo termico (destra). Comparazione del dato acquisito il 17 Aprile 2014 prima dell'installazione (in alto) con quello acquisito il 17 Aprile 2015 (in basso).

*Photographic shooting point T01: intensity extent of the infrared radiation emitted by the masonry (on the left) and its thermal profile (on the right). The assessment of the data acquired on 14 April 2014 before the installation (above) with the one acquired on 17 April 2015 (below).*

Campionamento del 14 Aprile 2014	Peso del contenitore + campione umido	Peso provetta	Peso del contenitore + campione secco(*)	Contenuto umido del campione	Peso campione umido	Peso campione secco	UMIDITÀ U%=Ca/Ps x100
	g	g	g	g	g	g	%
Contrassegno del campione: P1-B	23,0804	17,8816	22,7504	0,3300	5,1988	4,8688	<b>6,78</b>
Contrassegno del campione: P1-A	23,6747	18,1119	23,4090	0,2657	5,5628	5,2971	<b>5,02</b>

Nota: (\*)dopo 4h stabilizzato a 105 °C

Campionamento del 17 Aprile 2015	Peso del contenitore + campione umido	Peso provetta	Peso del contenitore + campione secco(*)	Contenuto umido del campione	Peso campione umido	Peso campione secco	UMIDITÀ U%=Ca/Ps x100
	g	g	g	g	g	g	%
Contrassegno del campione: P1-B	22,3921	18,1042	22,1800	0,2121	4,2879	4,0758	<b>5,20</b>
Contrassegno del campione: P1-A	23,6731	18,1495	23,5229	0,1502	5,5236	5,3734	<b>2,80</b>

Nota: (\*)dopo 4h stabilizzato a 105 °C

Tabella 1

Comparazione dei campioni di laterizio prelevati presso la *sala degli ermellini* prima dell'installazione (in alto) ed a distanza di un anno (in basso), campionati presso il laboratorio TekneHub secondo il metodo gravimetrico in accordo alla norma UNI 11085:2003. Dopo un anno di funzionamento si registra una riduzione media del contenuto umido pari al 32%.

*Comparison of brick samples taken from the sala degli ermellini before the installation (above) and one year later (below), sampled at the TekneHub laboratory according to the gravimetric method with regards to the UNI 11085: 2003 standard. After one year of functioning, an average of 32% reduction in water content is recorded.*

#### 4. Discussione dei risultati e Conclusioni

L'applicazione della tecnologia a neutralizzazione di carica ha dato risultati positivi, come atteso, che hanno favorito una riduzione media del contenuto umido nei campioni di laterizio del 32% a distanza di un anno dell'installazione. Il processo di asciugamento,

inoltre, è stato assistito dalla contemporanea scelta di installare un impianto di ventilazione igroregolato che, favorendo l'aerazione di un ambiente di ridotte dimensioni e con insufficienti aperture verso l'esterno come la sala degli ermellini, ha collaborato al naturale processo di estrazione dell'umidità per evaporazione. Neutralizzata l'azione elettrocinetica di richiamo dell'acqua dal suolo nei capillari, il tasso di umidità è andato riducendosi per evaporazione naturale, dimostrando come l'azione combinata delle due tecnologie contribuisca al raggiungimento di un risultato efficace. La scelta ricaduta sull'uso di un dispositivo igroregolato, inoltre, ha garantito il monitoraggio continuo delle caratteristiche fisiche dell'aria per evitare la formazione di umidità per condensazione. Nel corso del processo di evaporazione dell'umidità era atteso un incremento delle manifestazioni di degrado legate all'azione dei sali che, per la loro igroscopicità, al superamento del valore dell'umidità relativa sono indotti alla loro deliquescenza per poi ricristallizzare parzialmente, tanto da aumentare in modo rilevante la loro mobilità. Infatti, le variazioni giornaliere di temperatura provocano alterazioni dell'umidità relativa, così che in uno stesso giorno possono esserci molti cicli durante i quali i sali si disidratano e precipitando ricristallizzano, favorendo l'accumulo nelle parti alte delle murature. Pertanto, una delle azioni chiave da prendere in considerazione nella fase di asciugatura è un intervento di estrazione dei sali che prevenga la redistribuzione dei contaminanti salini nel materiale poroso. L'approccio olistico alla caratterizzazione dei contaminanti salini ha inteso indagare, durante la fase di asciugatura delle murature sottoposte all'azione della neutralizzazione della risalita capillare del contenuto umido, il legame causa-effetto nella formazione delle cristallizzazioni saline che, trasportate dal moto convettivo dell'umidità verso la superficie di evaporazione, favorisce la formazione di efflorescenze e sub-efflorescenze. Questo è tanto più importante quando si opera, ad esempio, in contesti figurativi rilevanti con presenza di pitture murali, richiedendo consapevolezza del fenomeno.

#### Referenze bibliografiche

- [1] Cigni G., Codacci-Pisanelli B. (1987). *Umidità e degrado negli edifici. Diagnosi e rimedi*. Roma: Edizioni Kappa.
- [2] Rossetto M. (2013). *Capillary rising damp in historical buildings: electrophysical charge neutralization technology - a needful "zero impact" instrument to prevent and resolve the problem once and for all*. In: Boriani M., Gabaglio R., Gulotta D. (ed.), *Proceedings of the International Conference "Built Heritage 2013 – Monitoring, Conservation, Management"* Milan-Italy, 18-20 November 2013, pp.1203–1211.
- [3] Olivato L. (1997). *Il Palazzo di Renata di Francia*. Ferrara: Corbo Editore.
- [4] Heiman J.L. (1982). *An evaluation of methods of treating rising damp*. In: Lieff M., Trechsel H.R., (ed.), *Moisture migration in buildings*. American Society for testing and materials, Baltimore (MD), p. 121–137.
- [5] Vogeley J. (1985). *Protection against rising damp in masonry: the baroque palace in Ludwigsburg, a case study*. In: *Building appraisal, maintenance and preservation. Proceedings of a 3 day symposium at the university of Bath, 10th-12th July 1985*. Bath: Department of architecture and building engineering, p. 113–123.
- [6] Searles-Wood H. D. (1910). *The Drying of Buildings, and some particulars of the Knapen Process*. In: *Journal of the Royal Sanitary Institute*, vol. 31, n.11, pp. 471–479.

- [7] Massari G., Massari I. (1985). *Risanamento igienico dei locali umidi*. *Bulletin of the Association for preservation technology*. Milano: Hoepli.
- [8] Cavaliere San-Bertolo N. (1831). *Istituzioni di architettura statica e idraulica*. Tipografia Cardinali e Frulli. Mantova: Fratelli Negretti, vol. 2, p. 147.
- [9] Warscheid T., Braams J. (2000). *Biodeterioration of stone: a review*. In: *International Biodeterioration & Biodegradation*, vol. 46, n. 4, pp. 343–368.
- [10] Zappia G., Sabbioni C., Riontino C., Gobbi G., and Favoni O. (1998). *Exposure tests of building materials in urban atmosphere*. In: *Science of the Total Environment*, vol. 224, n. 1–3, pp. 235–244.
- [11] Amoroso, G. and Camaiti, M. (2002). *Trattato di scienza della conservazione dei monumenti*. Firenze: Alinea.
- [12] Torraca, G. (2009). *Lectures on materials science for architectural conservation*. Los Angeles: Getty Conservation Institute, pp. 61–63.
- [13] Borrelli E. (1999). *Conservation of Architectural Heritage, Historic Structures and Material: Salts*. Rome: ARC Laboratory Handbook, ICCROM.
- [14] de Clercq H. (2008). *The effect of other salts on the crystallization damage to stone caused by sodium sulphate*. In: *Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures. Proceedings from the International Conference 22–24 October 2008*. Copenhagen: The National Museum, pp. 22–24.
- [15] Aa.Vv., (2013). *Records of UNESCO Conference 5-6 October 2012 “Metodo scientifico ed innovazione tecnologica per la salvaguardia e recupero del patrimonio storico. Casi applicativi ed esempi di successo nella diagnosi, prevenzione e risoluzione delle patologie da umidità capillare”*. Ragusa Ibla.
- [16] Vitiello V., Castelluccio R. (2019). *Il risanamento delle murature affette da umidità da risalita capillare. Il metodo CNT*. Napoli: Luciano editore.