

**SCIENZA E BENI CULTURALI**  
**XXX. 2014**

**QUALE SOSTENIBILITA' PER IL RESTAURO?**

**Atti del Convegno di Studi**  
**Bressanone 1 - 4 luglio 2014**

**Edizioni Arcadia Ricerche**

**Edizioni Arcadia Ricerche S.r.l.**

Parco Scientifico Tecnologico di Venezia  
via delle Industrie, 25/11- Marghera-Venezia  
Tel.: (041) 5093048 Fax: (041) 5093098  
E-mail: [arcadia@vegapark.ve.it](mailto:arcadia@vegapark.ve.it)  
[www.arcadiaricerche.eu](http://www.arcadiaricerche.eu)

---

**E' vietata la riproduzione, anche solo parziale, sotto qualsiasi forma o denominazione**

---

# SCIENZA E BENI CULTURALI

XXX. 2014

## QUALE SOSTENIBILITA' PER IL RESTAURO?

*Atti del convegno di studi*  
**Bressanone 1 – 4 luglio 2014**

a cura di Guido Biscontin e Guido Driussi

Organizzazione:

*Associazione Scienza e Beni Culturali;*

*Università degli Studi di Padova, Dipartimento di Scienze Chimiche;*

*Università Ca' Foscari di Venezia, Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatica e Statistica;*

*Università degli Studi di Genova, Dipartimento di Scienze per l'Architettura e Scuola di Specializzazione in Beni Architettonici e del Paesaggio;*

*Università Mediterranea degli Studi di Reggio Calabria, Dipartimento Patrimonio Architettonico ed Urbanistico;*

*Politecnico di Milano, Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito.*

Enti Patrocinatori:

*MiBACT Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo;*

*Consiglio Nazionale delle Ricerche;*

*Società Chimica Italiana – divisione di Chimica dell'Ambiente e i Beni Culturali,*

*Provincia Autonoma di Bolzano – Alto Adige*

Con la collaborazione di: *Provincia Autonoma di Bolzano - Alto Adige, Amministrazione Comunale di Bressanone, Azienda di Cura e Soggiorno di Bressanone, Arcadia Ricerche Srl, Associazione degli Amici Università di Padova, Colorificio San Marco SpA, Domodry Srl*

## **ORGANIZING COMMITTEE**

Andrea Alberti  
Salvatore Alberti  
Lorenzo Appolonia  
Paolo Bensi  
Enzo Bentivoglio  
Renzo Bertoncello  
Guido Biscontin  
Antonietta Boninu  
Roberto Bugini  
Emanuela Carpani  
Roberto Cecchi  
Renata Codello  
Stefano della Torre  
Carla Di Francesco  
Guido Driussi

Fabio Fratini  
Prisca Giovannini  
Giuseppe Longega  
Alessandra Marino  
Ruggero Martines  
Antonia Moropoulou  
Stefano Musso  
Roberto Parenti  
Anna Patera  
Serena Pesenti  
Daniela Pinna  
Antonio Rava  
Antonia Pasqua Recchia  
Lucia Saccani  
Elisabetta Zendri

## **SCIENTIFIC COMMITTEE**

Andrea Alberti  
Salvatore Alberti  
Giovanna Alessandrini  
Lorenzo Appolonia  
Pio Baldi  
Amedeo Bellini  
Enzo Bentivoglio  
Renzo Bertoncello  
Guido Biscontin  
Caterina Bon Valsassina  
Antonietta Boninu  
Roberto Bugini  
Agostino Bureca  
Carlo Carraro  
Giovanni Carbonara  
Roberto Cecchi  
Renata Codello  
Paola Raffaella David  
José Delgado Rodrigues  
Stefano Della Torre  
Carla Di Francesco  
Francesco Doglioni  
Guido Driussi  
Fabio Fratini  
Luigi Fozzati  
Prisca Giovannini

Stefano Gizzi  
Mario Lolli Ghetti  
Giuseppe Longega  
Alessandra Marino  
Ruggero Martines  
Guido Meli  
Antonia Moropoulou  
Stefano Musso  
Giorgio Palandri  
Roberto Parenti  
Anna Patera  
Serena Pesenti  
Clara Peranetti  
Daniela Pinna  
Antonio Rava  
Antonia Pasqua Recchia  
Luca Rinaldi  
Lucia Saccani  
Antonio Sgamellotti  
Franco Tomaselli  
Eugenio Tondello  
Paolo Torsello  
GianPaolo Treccani  
Mario Turetta  
Alberto Vanelli  
Elisabetta Zendri

# 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

*Rossetto M.*

Gruppo Leonardo Solutions – Domodry, Legnano (MI), Italy

## **Abstract**

Among those working in the field, capillary rising damp is a well-known problem, particularly considering the serious consequences and typical pathological effects it has on masonry — and by pathologies we mean all forms of deterioration caused by moisture on surfaces and/or inside the walls (chemical, physical, biological decay, etc.) — and on the thermo-hygrometric conditions of the internal environments, reducing the sense of wellness and increasing the risks for both human health and preservation of the works of art contained therein.

Nevertheless, if we take a close look at all the techniques currently used to counteract this problem and run a statistical analysis of their "dehumidification capacity" and the "duration of the effect" in time, we find that none of the above techniques have been able to resolve the problem, much less guarantee the results in the long run.

This is due to the fact that the "modeling" of the phenomenon of "capillary rising damp" used to set-up and apply the various techniques was wrong or incomplete, only partially representing the real physical phenomenon.

Instead, the charge neutralization technology (C.N.T.) takes a different tack, turning previous approaches to the problem on their ear. Indeed C.N.T. has succeeded where previous techniques have failed — achieving total, definitive resolution for nearly any type of building material, structure, age or site, and no matter what the starting water and/or salt content in the walls!

## **1 INTRODUZIONE**

Il problema dell'umidità da risalita capillare è sicuramente ben conosciuto tra gli addetti ai lavori, soprattutto per ciò che concerne le gravi conseguenze e gli effetti di tipo patologico provocati sulle murature, intendendo con ciò tutte le forme di degrado che potenzialmente l'umidità è in grado di indurre sulla superficie e/o all'interno dell'opera muraria (degrado di tipo chimico, fisico, biologico, ecc.), nonché sulle condizioni termoigrometriche degli ambienti interni, con conseguente decadimento del livello di benessere e insorgenza di rischi sia per la salute delle persone che per la conservazione di eventuali opere d'arte ivi presenti.

Tuttavia, pur considerando tutte le tecniche d'intervento sino ad oggi impiegate per contrastare il problema e analizzandone, dal punto di vista statistico, gli esiti e i

risultati conseguiti in termini di “capacità di deumidificazione” della muratura e di “durata degli effetti” nel tempo, emerge che nessuna delle suddette tecniche si è dimostrata in grado di risolvere il problema in modo generalizzato e tantomeno stabile nel tempo.

Ciò è verosimilmente imputabile al fatto che l’interpretazione o “modellazione” del fenomeno fisico “risalita capillare nella muratura” che è stata assunta per la messa a punto e l’applicazione delle varie tecniche non era quella giusta, o quantomeno era parziale e/o incompleta rispetto al reale fenomeno fisico.

Nel caso della tecnologia a neutralizzazione di carica (T.N.C.) si è dunque partiti dal presupposto di ribaltare l’approccio al problema rispetto alle tecniche precedenti, e questo è proprio ciò che ha consentito alla T.N.C. di arrivare là dove tutte le precedenti tecniche avevano fallito, ovvero ad un risultato caratterizzato da una percentuale di successo totale e definitiva per qualsiasi tipo di materiale, struttura, età o sedime dell’edificio, e per qualsivoglia valore iniziale del contenuto d’acqua e/o di sali della muratura!

## **2 IL FENOMENO FISICO DELL’UMIDITÀ ASCENDENTE NELLE MURATURE**

Per comprendere come funziona la T.N.C., occorre innanzitutto partire dal fenomeno fisico “umidità di risalita capillare” nella muratura.

Come noto, il fenomeno della capillarità trae origine dalla complessa interazione chimica e fisica che si esplica tra le molecole d’acqua presenti nel terreno sottostante e/o adiacente alle murature e i materiali porosi costituenti le murature stesse.

Ma il classico modello di tipo “statico” - ovvero quello del tubo capillare descritto dalla ben nota Legge di Jurin<sup>1</sup> - non è sufficiente, da solo, a descrivere il fenomeno reale. Come ben noto, infatti, all’interno dei capillari della muratura l’acqua non rimane immobile come nel modello di Jurin, ma al contrario è soggetta ad un movimento ciclico dal basso verso l’alto, la cui velocità, altezza e intensità risultano variabili in funzione del tasso di evaporazione dell’acqua attraverso la muratura, a sua volta dipendente dalle più generali condizioni al contorno (tipo di materiale e spessore del muro, tipo di terreno e quantità d’acqua in fondazione, condizioni termo-igrometriche interne ed esterne, ecc...).

Tale movimento (vero e proprio flusso) dell’acqua nei condotti capillari della muratura è fortemente influenzato, oltre che dalla tensione superficiale e dall’evaporazione, da un ulteriore importante fattore, rappresentato dal “doppio strato di Helmholtz” associato al potenziale elettrostatico negativo che si instaura, per via naturale, sulle pareti interne dei capillari (fig.1) e che, all’interno della muratura, risulta avere un effetto preponderante rispetto alla stessa tensione superficiale.

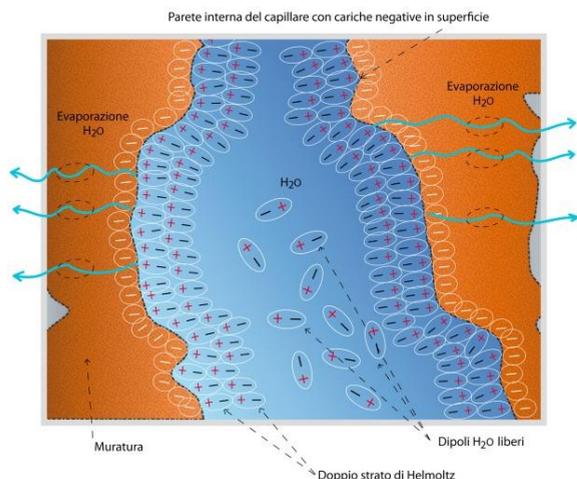


Fig.1 – Rappresentazione schematica del “doppio strato di Helmholtz” all’interno del capillare

A scala microscopica, infatti, la superficie di un materiale contenente silice (componente base della maggior parte dei materiali da costruzione) è carica di un potenziale elettrostatico negativo. Pertanto, le pareti interne dei capillari, cariche negativamente, tenderanno ad attrarre le molecole (dipoli) d’acqua, che risulteranno quindi orientate con il polo positivo verso la parete interna - negativa - del capillare: il “doppio strato” di dipoli che ne deriva è detto di Helmholtz<sup>2</sup>.

Quando esiste un flusso di risalita capillare alimentato da una evaporazione in atto dalla parete di un muro, questo movimentata lo strato di Helmholtz e, di conseguenza, genera un debole potenziale elettrico differenziale (inferiore ad 1 V) misurabile tra la terra ed il muro. L’entità del potenziale, in millivolt [mV], è proporzionale all’intensità del flusso di risalita, a sua volta correlato al tasso di evaporazione. I valori del potenziale, misurabili tramite un semplice tester, variano dai 10÷20 mV (risalita debole o assente) fino a 300÷500 mV (risalita molto forte).

Tutto ciò dimostra che il fenomeno “umidità capillare” all’interno della muratura, essendo strettamente correlato al potenziale elettrico differenziale del doppio strato di dipoli d’acqua (Helmholtz), è in ultima analisi governato **dall’azione di forze infinitesimali di natura elettrica**.

Ecco dunque che, per superare i limiti a tutt’oggi palesati dalle soluzioni di tipo tradizionale (ovvero quelle “a sbarramento” agenti sugli effetti della risalita capillare e non sulle cause), è stato ideato e messo a punto un sistema – quale appunto la T.N.C. - in grado di neutralizzare direttamente sul nascere proprio le forze di natura elettrica all’origine della risalita stessa.

Oltretutto, un sistema così concepito, dovendo contrastare solo forze infinitesimali, si rivela in definitiva anche assai meno dispendioso, in termini energetici, rispetto a qualunque altro sistema tradizionale che, come noto, risulta di per sé assai più “energivoro”.

### 3 IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO DELLA T.N.C.

La tecnologia a neutralizzazione di carica (T.N.C.) rappresenta un'applicazione derivata da studi sperimentali condotti, nel campo delle nano-tecnologie, da Università ed Enti di ricerca internazionali a partire dai primi anni 2000.

Il principio scientifico utilizzato per contrastare il fenomeno della risalita capillare si basa sull'applicazione di particolari fenomeni fisici denominati dagli addetti ai lavori con i termini "elettro-capillarità"<sup>3</sup> ed "electrowetting"<sup>4</sup>, come dal modello sperimentale di Figura 2.

In base ai suddetti studi sperimentali risulta possibile, mediante l'applicazione di un campo elettromagnetico esterno, indurre variazioni nella distribuzione delle cariche elettriche all'interfaccia tra un liquido conduttore (ad es. una soluzione acquosa salina) e una superficie solida (ad es. una parete interna di un micro-capillare), effetto che dal punto di vista fisico si traduce nella possibilità di modificare il flusso del liquido all'interno del capillare.

Sfruttando tali principi è stato dunque concepito il dispositivo T.N.C. che, in sostanza, risulta essere un generatore di deboli onde elettromagnetiche impulsive, opportunamente modulate in un definito range di frequenze, totalmente innocue per l'organismo umano, il cui effetto risultante all'interno dei capillari della muratura è quello di **neutralizzare il potenziale elettrico differenziale del flusso capillare**, così da interrompere alla radice – ovvero al contatto stesso tra acqua e muratura – la risalita dell'umidità (Fig.3).

Tratto da: "Fluid Control in Multichannel Structures by Electrocapillary Pressure", by M. W. J. Prins, W. J. J. Welters, J. W. Weekamp, Philips Research Laboratories Eindhoven, Prof. Holstlaan 4, 5656 AA Eindhoven, The Netherlands. SCIENCE Vol.291, pp.277-280, 12 January 2001; (Copyright © 2001 American Association for the Advancement of Science).

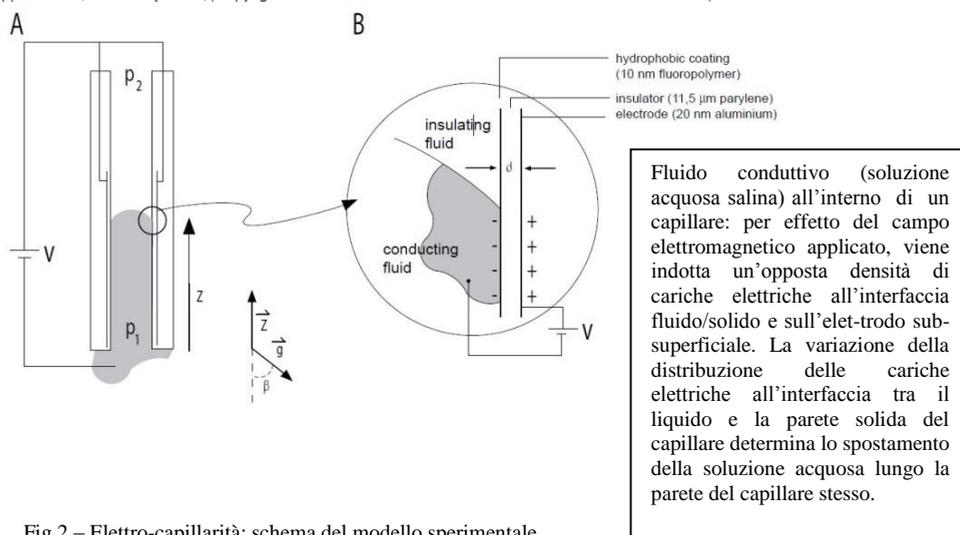


Fig 2 – Elettro-capillarità: schema del modello sperimentale

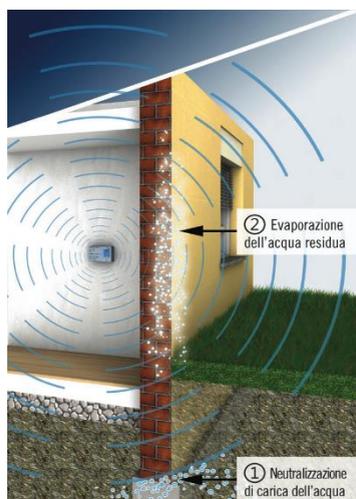


Fig.3 – Principio di funzionamento della T.N.C. Domodry®

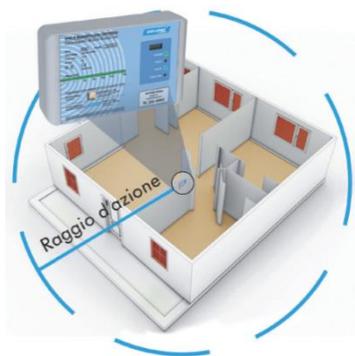


Fig.4 – Collocazione dell'apparecchio Domodry® all'interno dell'edificio

Semplificando molto il concetto, si può dire che la T.N.C. neutralizza, al contatto acqua-muratura, la capacità delle molecole d'acqua di polarizzarsi, facendo in modo che rimangano neutre e, conseguentemente, non possano più essere attratte per differenza di carica da parte dei capillari della muratura<sup>5</sup>.

Ciò costituisce, in estrema sintesi, il peculiare ed esclusivo “principio attivo” che caratterizza la T.N.C. Domodry® che pertanto, nel panorama dei sistemi a funzionamento elettrico presenti sul mercato, si contraddistingue in assoluto come primo e unico **sistema elettrofisico “a neutralizzazione di carica”**<sup>6</sup>.

Dal punto di vista applicativo, il dispositivo Domodry® consiste in un apparecchio (Figura 4) di piccole dimensioni (28 x 17 x 6 cm) che viene collocato all'interno dell'edificio e collegato ad una presa elettrica. Una volta in funzione, esso inibisce alla radice il fenomeno della capillarità, interrompendo così la risalita di nuova acqua attraverso i capillari del muro. L'umidità in eccesso viene quindi espulsa gradualmente tramite evaporazione spontanea, più o meno velocemente a seconda delle caratteristiche costruttive del muro, della quantità d'acqua inizialmente presente nel muro stesso, nonché delle condizioni climatiche del luogo.

Completata la deumidificazione, sarà sufficiente mantenere in funzione l'impianto T.N.C. così da garantire, tramite l'azione di prevenzione anti-risalita esplicata dall'impianto stesso, il

mantenimento in via permanente dello stato di equilibrio (umidità igroscopica naturale) raggiunto dalla muratura.

Domodry® agisce in un campo d'azione sferico con raggio variabile – a seconda del modello di apparecchio - da un minimo di 6 m sino a un massimo di 15 m, garantendo la deumidificazione di tutte le strutture (muri, pareti divisorie, solette, ecc.) presenti all'interno di tale campo, a prescindere dalla presenza di muri interni che non costituiscono una barriera al sistema. Gli impulsi generati dall'apparecchio, di gran lunga inferiori a quelli di un normale elettrodomestico<sup>7</sup>,

sono totalmente innocui sia per le persone che per gli animali (l'apparecchio è certificato come bio-edile).

In base alle dimensioni dell'edificio, gli apparecchi possono essere installati singolarmente (impianto singolo) o in modo combinato tra loro (impianto multiplo): ciò consente la massima flessibilità e possibilità di adattamento dell'impianto a manufatti edilizi di qualsiasi tipologia e dimensione, dalla più piccola abitazione al più complesso fabbricato o edificio monumentale.

Risulta superfluo sottolineare come un altro dei pregi di questa tecnologia sia la assoluta mancanza di invasività, tanto da renderla il miglior tipo di intervento in assoluto utilizzabile nell'ambito della conservazione preventiva e programmata del patrimonio storico artistico.

### **5 DIFFERENZE TRA LA T.N.C. ED ALTRI SISTEMI “SIMILARI”**

È importante sottolineare le differenze sostanziali che contraddistinguono la T.N.C. da altri sistemi solo apparentemente simili (sistemi a funzionamento elettrico o magnetico basati su principi diversi). Infatti, la T.N.C. è stata ideata per superare e migliorare l'efficacia dei vari sistemi elettro-osmotici ed elettrofisici già in uso e, per quanto ormai obsoleti, ancor oggi presenti sul mercato.

Di fatto, nell'arco di oltre trent'anni di applicazioni i suddetti sistemi hanno palesato, nei confronti dell'umidità muraria di origine capillare, risultati solo parziali e/o temporanei, quasi sempre dipendenti dalla tipologia costruttiva dell'immobile e/o dalle specifiche condizioni di intervento. In sostanza, detti sistemi si sono rivelati essere privi di sufficienti garanzie di efficacia nei riguardi sia del grado di deumidificazione raggiungibile, sia del mantenimento nel tempo del risultato (comunque insufficiente) raggiunto.

Dal 2003 è stata quindi avviata, in collaborazione con alcuni importanti Centri universitari, una campagna di sperimentazione e ricerca<sup>8</sup> per il miglioramento dei preesistenti sistemi elettrofisici, che ha portato, nel 2008-09, al brevetto e allo sviluppo di un dispositivo dotato di una tecnologia più avanzata e di concezione totalmente innovativa, quale appunto la T.N.C.

Tutto ciò dimostra l'assoluta unicità della T.N.C., che differisce totalmente dai precedenti sistemi elettro-osmotici/elettrofisici (ovvero a inversione di polarità e/o di flusso) i quali, agendo sulla differenza di potenziale elettrico tra acqua e muratura (molto variabile da punto a punto in quanto influenzata dalla disomogeneità della muratura stessa) forniscono, inevitabilmente, risultati di dubbia efficacia. Al contrario, la T.N.C. agisce in modo opposto (ovvero direttamente sull'acqua e non sulla muratura) e senza nessuna possibilità di errore, in quanto neutralizza la capacità dell'acqua (sempre uguale) di lasciarsi attrarre dalle murature. Per i suddetti motivi, la T.N.C. rappresenta oggi l'unico sistema in grado di garantire la totale eliminazione dell'umidità muraria di origine capillare nel 100% dei casi e in modo illimitato nel tempo<sup>9</sup>.

## **6 APPLICAZIONI DELLA T.N.C.: SPERIMENTAZIONI E RISULTATI**

L'efficacia dei risultati conseguibili, in termini di deumidificazione muraria, con l'applicazione della T.N.C., risulta comprovata dai dati sperimentali raccolti in svariate installazioni pilota, effettuate in collaborazione con Istituti universitari ed Enti terzi.

La valutazione dei risultati è stata effettuata analizzando, nelle diverse aree soggette all'azione dell'impianto, le variazioni dei contenuti di acqua delle murature nel tempo, mediante la seguente metodologia d'indagine:

- la misura del contenuto di acqua nelle murature mediante il metodo ponderale (Norma UNI 11085);
- la mappatura termografica IR delle superfici interne dell'edificio.

Per ciascuna installazione, le suddette misure sono state ripetute in tre sessioni: la prima al momento - o immediatamente prima - dell'installazione dell'impianto, la seconda e la terza rispettivamente durante la fase di asciugatura e al termine della stessa.

Mettendo in correlazione l'immagine termografica con il dato fornito, nel medesimo tratto di muratura, dalla misurazione puntuale del contenuto d'acqua, è risultato possibile con buona approssimazione estrapolare i dati forniti dalle immagini termografiche anche alle zone non direttamente indagate tramite prelievi puntuali, con ovvi vantaggi in termini di estensione, quantità e ripetibilità dei dati acquisibili senza necessità di ulteriori prelievi invasivi.

Su alcuni dei campioni prelevati nella prima sessione di misure sono state inoltre effettuate le analisi dei contenuti in sali solubili mediante cromatografia ionica, al fine di valutare l'entità e lo stato di degrado della muratura.

A titolo esemplificativo, si illustrano di seguito alcuni casi applicativi realizzati con pieno successo in importanti edifici storici in Italia.

### **6.1 Basilica di S. Simpliciano in Milano<sup>10</sup>**

#### **Inquadramento**

L'imponente complesso di San Simpliciano (Figura 5) fu eretto tra la fine del IV secolo e gli inizi del V: dall'originaria pianta a croce latina i vari rimaneggiamenti subiti nel corso dei secoli.

Al momento dell'intervento qui descritto l'edificio mostrava evidenti segni di degrado imputabile alla presenza di acqua e sali nelle murature, dovuti a fenomeni di risalita capillare: efflorescenze, macchie, perdite dello strato superficiale nelle parti intonacate e addirittura lacune nei mattoni a vista (Figura 6). La situazione ha pertanto suggerito l'installazione del sistema "a neutralizzazione di carica" per la deumidificazione delle murature.

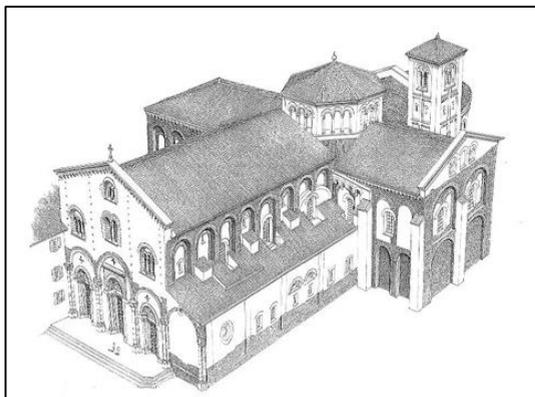


Fig.5 – Complesso di San Simeoniano



Fig.6 – Esempi di degrado delle superfici

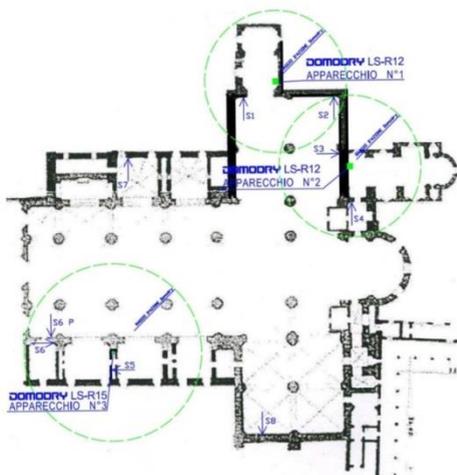
### Applicazione

L'impianto T.N.C. - installato nel maggio 2009 - è costituito da n°3 apparecchi Domodry (Figura 7) posizionati nelle zone che risultavano maggiormente colpite dall'umidità (Transetto di sinistra e Navata di destra).

Fig.7 – Disposizione degli apparecchi Domodry con relativi raggi d'azione e ubicazione dei punti di misura dell'umidità muraria

In Figura 7 è riportata l'ubicazione delle varie zone selezionate per la misura dell'umidità muraria con il metodo ponderale. Le zone da S1 ad S6 ricadono all'interno del campo d'azione coperto dall'impianto T.N.C., mentre le zone S7 ed S8 ricadono all'esterno di questo. In ciascuna zona di misura sono stati scelti due Punti di misura posti l'uno alla quota di circa

30 cm dal piano di calpestio e l'altro a 160 cm, quota scelta per verificare il limite raggiunto dal fenomeno di risalita capillare in atto (così come lasciavano intendere le tracce del fronte di risalita visibili sulle pareti che si fermavano, appunto, ad un'altezza di poco inferiore). In tutti i Punti di misura sono stati prelevati due campioni, uno in superficie (tra 0,5 e 2 cm dalla superficie) e uno in profondità (tra 6 e 8 cm dalla superficie).



Alla prima sessione di misure, eseguita nel maggio 2009 immediatamente prima dell'attivazione dell'impianto di deumidificazione T.N.C., ne è seguita una seconda nel settembre 2010 e una terza nell'aprile 2012, rispettivamente dopo 16 mesi e dopo 3 anni di funzionamento dell'impianto.

## Risultati

I dati complessivamente forniti dal metodo ponderale nelle tre successive sessioni di misura sono riportati nella Tabella 1.

CONTENUTI DI ACQUA [%]						
PUNTO	MATERIALE	ALTEZZA [cm]	PROF [cm]	MAGGIO 2009	SETTEMBRE 2010	APRILE 2012
S1-S-30	MATTONE	26	2	1,8	1,4	1,6
S1-P-30	MATTONE	26	8	8,0	5,4	2,3
S1-S-160	MATTONE	160	2	0,7	0,9	1,4
S1-P-160	MATTONE	160	8	0,4	0,3	0,4
S2-S-30	INT-MAT	30	2	21,8	15,6	16,5
S2-P-30	MATTONE	30	8	16,8	7,2	4,1
S2-S-160	MATTONE	160	2	0,7	0,5	0,4
S2-P-160	MATTONE	160	8	0,4	0,3	0,4
S3-S-30	MATTONE	26	2	7,8	6,8	4,3
S3-P-30	MATTONE	26	8	7,7	6,4	2,5
S3-S-160	MATTONE	160	2	4,1	2,7	3,4
S3-P-160	MATTONE	160	8	0,3	0,3	0,5
S4-S-30	MATTONE	27	2	1,7	1,5	1,2
S4-P-30	MATTONE	27	8	1,7	1,7	1,0
S4-S-160	MATTONE	160	2	0,4	0,3	0,5
S4-P-160	MATTONE	160	8	0,4	0,3	0,5
S5-S-30	INTONACO	30	2	3,5	2,7	3,8
S5-P-30	MATTONE	30	8	4,5	4,1	1,8
S5-S-160	INTONACO	160	2	1,6	1,4	1,2
S5-P-160	MALTA	160	8	1,4	1,4	1,6
S6-S-30	INTONACO	30	2	6,1	4,4	6,1
S6-P-30	MATTONE	30	8	8,3	6,5	6,5
S6P-S-30	MATTONE	30	2	6,6	6,6	6,2
S6P-P-30	MATTONE	30	8	4,8	5,0	3,8
S7-S-30	INTONACO	10	2	3,3	3,4	3,3
S7-P-30	MATTONE	10	8	3,1	2,9	2,7
S8-S-30	INTONACO	30	2	5,5	5,8	4,6
S8-P-30	MATTONE	30	8	3,2	1,5	0,8

Tab.1 – Valori di contenuto d'acqua misurati con il metodo ponderale nelle 3 sessioni di misura

Per una valutazione dell'effetto di deumidificazione muraria indotto dall'impianto T.N.C., risulta in particolar modo significativo analizzare l'andamento nel tempo delle misure di contenuto d'acqua con metodo ponderale relative ai punti da S1 ad S6 ricadenti all'interno del campo d'azione dell'impianto e ubicati in basso (a 30 cm di altezza da pavimento), andamento sintetizzato nei grafici di Figura 8 e 9 che rappresentano rispettivamente i prelievi in superficie e quelli in profondità.

In estrema sintesi, dai suddetti grafici si rileva che, mentre nel maggio 2009 il valore medio globale calcolato su tutte le misure indicava un contenuto di acqua praticamente omogeneo nell'intera struttura muraria e pari al 7,2% in superficie e al 7,5% in profondità, dopo tre anni di funzionamento dell'impianto si è passati al

5,6% in superficie e al 2,8% in profondità, valore quest'ultimo corrispondente a quello dell'umidità fisiologica (o di equilibrio) del mattone asciutto.

Si osserva per inciso che la più consistente diminuzione del contenuto d'acqua registrata in profondità rispetto al corrispondente valore in superficie rappresenta un'ulteriore riprova che, in origine, era la risalita capillare dal terreno – ora non più presente - ad essere la principale via di apporto di acqua alla muratura.

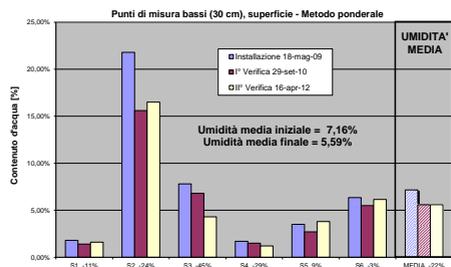


Fig.8 – Valori di contenuto d'acqua misurati in superficie con il metodo ponderale nelle 3 sessioni di misura

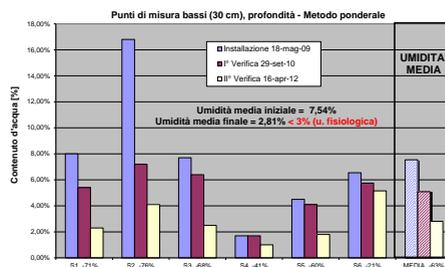


Fig.9 – Valori di contenuto d'acqua misurati in profondità con il metodo ponderale nelle 3 sessioni di misura

E' peraltro assai verosimile che la permanenza in superficie – ma non più in profondità - di valori di contenuto d'acqua piuttosto elevati risulti associata alla presenza, proprio in superficie, di sali in forti concentrazioni (presenza confermata in effetti dalle analisi condotte con cromatografia ionica), che dunque possono trattenere per igroscopia elevati tenori d'acqua, anche semplicemente prelevandoli dall'umidità ambientale. In tal caso, il problema potrà essere risolto tramite uno specifico intervento di risanamento della superficie muraria, volto ad estrarre/rimuovere dalla superficie stessa i sali in eccesso (ad es. tramite impacchi con specifici prodotti).

Anche le termografie ripetute sulle diverse superfici della chiesa hanno indicato una generale riduzione delle zone umide presenti alla base della muratura, con pareti che presentano una distribuzione di temperature sempre più uniforme (ovvero una significativa riduzione del gradiente termico tra la porzione superiore e quella inferiore della muratura) a tre anni di funzionamento dell'impianto di deumidificazione T.N.C..

A titolo di esempio, in Figura 10 si riporta una scheda con le immagini nel campo del visibile, le corrispondenti immagini termografiche e i relativi profili di temperatura lungo una verticale per la zona del Punto di misura S3.

La documentazione completa delle attività di monitoraggio può essere richiesta gratuitamente a Leonardo Solutions srl.

## 6.2 Chiesa di S. Antonin in Venezia<sup>11</sup>

### Inquadramento

Ubicata in Sestiere Castello a Venezia, la Chiesa di S. Antonin (Fig. 11), di originaria costruzione risalente al VII secolo, trae l'attuale aspetto dai lavori di ricostruzione pressoché completa del sec. XVII. L'opera muraria è costituita prevalentemente da muratura in mattoni pieni e malta. La Chiesa, oggetto di un complesso intervento di restauro intrapreso a partire dal 1990 e di recente concluso, ha rappresentato un'importante occasione per avviare la sperimentazione dell'innovativa tecnologia elettrofisica "a neutralizzazione di carica" anche a Venezia ove, come ben noto, molteplici sono state, nel corso tempo, le tecniche d'intervento impiegate nel tentativo di contrastare lo storico problema dell'umidità di risalita nelle murature.



Fig. 11 – La Chiesa di Sant'Antonin



Fig. 12 – Esempi di degrado delle superfici

Nel corso del restauro era stato peraltro sperimentato un sistema deumidificante a radiofrequenze contro l'umidità muraria da risalita capillare (sistema elettrofisico), sistema che non aveva dato risultati significativi e che, pertanto, era stato rimosso. Erano state inoltre effettuate, su murature con particolari problemi di degrado (Figura 12), prove sperimentali su malte risananti, con monitoraggio degli andamenti nel tempo delle percentuali di umidità e sali. Sul lato perimetrale sud dell'edificio è inoltre presente una barriera anti-capillare realizzata, sempre nell'ambito del suddetto restauro, mediante taglio meccanico.

In questo quadro si è dunque inserita la sperimentazione in oggetto, con installazione della tecnologia "a neutralizzazione di carica", avviata nel mese di

luglio 2011 e localizzata in corrispondenza della parete nord della chiesa dove, per particolari problemi di conservazione di strutture ed elementi decorativi di interesse storico, nel corso del restauro non era stato possibile intervenire con risanamenti murari troppo invasivi. L'impianto T.N.C. è costituito da n°1 apparecchio Domodry posizionato in corrispondenza della parete nord della chiesa, in prossimità della cappella di San Saba.

## Risultati

I dati di misura forniti dal metodo ponderale nelle tre successive sessioni (maggio 2009, settembre 2010 e aprile 2012) sono riportati nella Tabella 2.

PRELIEVO (per la posizione dei punti di prelievo vedere planimetria allegata)		% UMIDITA' ALLA DATA DI INSTALLAZIONE 13/07/2011		% UMIDITA' ALLA DATA DELLA PRIMA VERIFICA 14/06/2012		% UMIDITA' ALLA DATA DELLA SECONDA VERIFICA 08/10/2013	
P1A	H= 90cm prof=5÷10	matt rosso p.u.= 25,774	10,5%	matt. rosso p.u.= 23,450	8,5%	matt. rosso p.u.= 20,623	5,99%
P1B	H= 20cm prof=5÷10	malta p.u.= 25,760	17,9%	matt. rosso p.u.= 21,511	26,8%	matt. rosso p.u.= 21,369	5,36%
P2A	H= 90cm prof=5÷10	matt chiaro p.u.= 26,293	3,5%	matt. rosso p.u.= 23,149	1,9%	matt. rosso p.u.= 22,235	1,06%
P2B	H= 20cm prof=5÷10	matt chiaro p.u.= 28,461	15,5%	matt. rosso p.u.= 23,810	9,4%	matt. rosso p.u.= 22,763	7,28%

Tab.2 – Valori di contenuto d'acqua misurati con il metodo ponderale nelle 3 sessioni di misura

Per una valutazione dell'effetto di deumidificazione muraria indotto dall'impianto T.N.C., risulta significativo analizzare il grafico di Figura 13 che sintetizza l'andamento nel tempo delle misure di contenuto d'acqua con metodo ponderale.

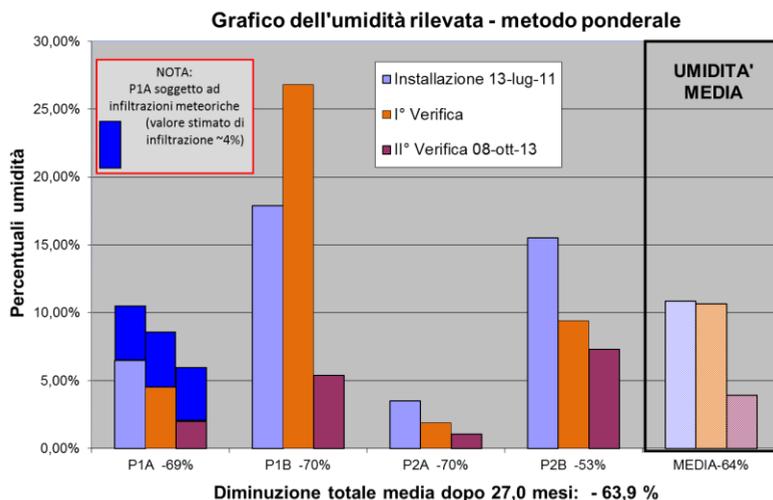


Fig.13 – Valori di contenuto d'acqua misurati in profondità con il metodo ponderale nelle 3 sessioni di misura

A distanza di poco più di due anni dall'attivazione dell'impianto T.N.C., la campagna di misure ha evidenziato le seguenti risultanze:

- In corrispondenza di tutti i saggi si è riscontrata una notevole diminuzione dell'umidità ponderale, pari al -63,9% rispetto ai corrispondenti valori iniziali (valore medio iniziale del 10,85% con punte fino al 17,90% del saggio P1B);
- Per il saggio P1A si è registrata una diminuzione del tasso di umidità in linea con il comportamento generale, tuttavia il valore di umidità residua in questo punto è rimasto relativamente più alto, in quanto alimentato da infiltrazioni meteoriche esterne (pluviale ad embrici danneggiato sul paramento esterno);
- in considerazione del valore di umidità media residua raggiunto con l'ultimo Rilievo (3,92%), ormai prossimo al normale valore dell'umidità fisiologica del mattone asciutto, il processo di deumidificazione dell'edificio può ritenersi sostanzialmente in via di completamento.

Anche le termografie ripetute nelle zone di controllo hanno indicato, in piena coerenza con le misure fornite dalle prove ponderali, una generale e progressiva riduzione delle zone umide presenti alla base della muratura. A titolo di esempio, si riporta in Figura 18 la scheda termografica della zona dei Punti di misura P2A/B.

### 6.3 Cripta del Duomo di Lecce<sup>12</sup>

#### Inquadramento

Ubicato nel centro storico di Lecce, il Duomo (Figura 14) è costruito con la pietra leccese, lapideo naturale tipico del territorio locale e ampiamente diffuso nel patrimonio monumentale ed edilizio del Salento, considerato tra i materiali porosi più facilmente degradabili. In particolare, la pietra ha proprietà e composizione chimico-fisica tali da favorire la risalita capillare di acqua.

Con l'obiettivo di verificare l'efficacia dell'innovativa tecnologia "a neutralizzazione di carica" nel fermare l'umidità di risalita nella pietra e, quindi, favorirne l'asciugamento, è stato condotto un intervento pilota nei locali ipogei della Cripta sottostante all'aula ecclesiale, ovvero nella zona dell'edificio maggiormente aggredita dall'umidità e caratterizzata da un forte degrado (Fig.15).



Fig.14 – Il Duomo di Lecce



Fig.15 – La Cripta del Duomo di Lecce

Le indagini multidisciplinari realizzate, a cura del Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento, precedentemente all'avvio dell'intervento pilota con T.N.C., avevano evidenziato nella Cripta una situazione ambientale assai compromessa, oltre che dall'umidità di risalita capillare, anche da infiltrazioni occasionali di acqua dall'esterno.

Mediante monitoraggio microclimatico, nel periodo novembre 2008 - aprile 2010 erano stati registrati gli andamenti e i cambiamenti di temperatura e umidità relativa nella Cripta, riscontrando nel periodo considerato una certa stabilità di situazione microclimatica, grazie alle mura perimetrali spesse circa due metri, all'assenza di riscaldamento e contributo di radiazione solare, alla ridotta frequentazione turistica e liturgica. Il monitoraggio aveva escluso che l'umidità ambientale potesse avere origine da fenomeni di condensazione superficiale: le fonti principali, invece, oltre alle infiltrazioni esterne, erano state riscontrate nei sali igroscopici e nella risalita capillare, che risultava alimentata in modo permanente e proveniente sia dal terreno di fondazione, sia dalle murature perimetrali controterra, cioè dalla risalita laterale. La contaminazione da sali portati in soluzione dalla risalita (Figura 16), in atto da secoli nel monumento, era stata poi ulteriormente aggravata da una serie d'interventi inappropriati. Nel tempo, i cristalli hanno progressivamente intasato i pori della pietra leccese e ridotto la quantità di fuoriuscita di soluzione salina rispetto a quando questa poteva evaporare del tutto, determinando la formazione di sub-efflorescenze. Ciò ha appunto determinato il progressivo innalzamento dell'altezza del livello di fuoriuscita salina e di evaporazione.

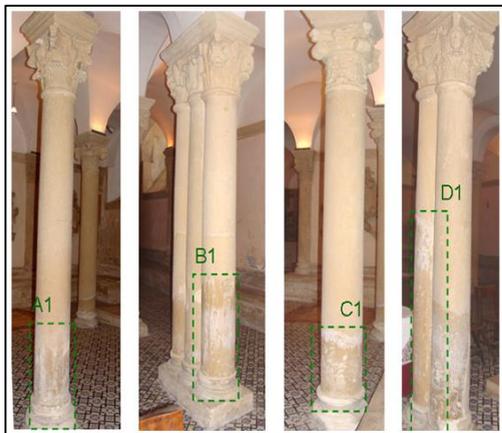


Fig.16 – Fenomeni di degrado delle superfici lapidee delle colonne provocati da efflorescenze saline



Fig.17 – Uno dei due dispositivi Domodry installato all'interno della Cripta

In questo quadro si è dunque inserita la sperimentazione in oggetto, con installazione della tecnologia “a neutralizzazione di carica”, avviata nel novembre 2011. L’impianto T.N.C. è costituito da n°2 dispositivi Domodry posizionati superiormente alle cornici delimitanti, all’altezza delle volte, le pareti perimetrali della cripta (Figura 17).

Per quanto riguarda la metodologia d’indagine, non essendo possibile procedere, sulle superfici in pietra a vista, al prelievo di campioni di muratura a causa della eccessiva invasività del metodo, si è rinunciato all’esecuzione delle prove ponderali, optando per una metodologia non distruttiva quale la mappatura termografica IR, che è stata estesa alle superfici murarie e ad alcune colonne. È stata inoltre avviata un’attività di monitoraggio (tuttora in corso) per la verifica delle variazioni dei parametri microclimatici durante il processo di deumidificazione, mediante analisi dei dati acquisiti tramite un apposito sistema di telecontrollo installato all’interno della cripta e costituito da sonde/trasmittitori wireless comunicanti con un concentratore di dati interrogabile a distanza tramite modem GSM.

### **Risultati**

Le analisi termografiche sono state ripetute in tre successive sessioni, e precisamente:

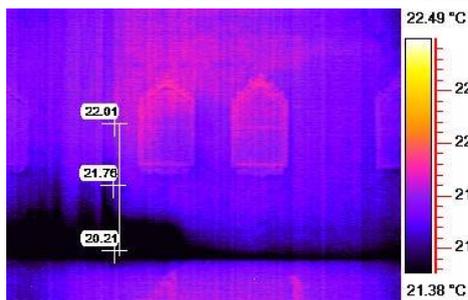
- 1° Rilievo nel dicembre 2011 (ad installazione impianto T.N.C.);
- 2° Rilievo nel dicembre 2012 (dopo circa un anno);
- 3° Rilievo del febbraio 2014 (dopo circa due anni).

I rilievi eseguiti in sito durante i primi due anni dall’attivazione dell’impianto di deumidificazione muraria indicano risultati positivi in termini di riduzione dell’iniziale, anomalo contenuto d’acqua della muratura. Le analisi termografiche hanno infatti evidenziato, all’atto dei successivi rilievi, una progressiva diminuzione delle anomalie termiche, sia in relazione all’altezza in cui si registra il raggiungimento della temperatura di equilibrio della muratura stessa, sia in relazione al gradiente nella distribuzione delle temperature superficiali. Tali risultanze sono confermate dall’andamento dei profili termici eseguiti lungo la sezione verticale: tra le zone a ridosso del pavimento e quelle più distanti dal suolo emerge un gradiente nella distribuzione delle T superficiali mediamente pari a circa 0,20 °C, rispetto al valore iniziale di 0,65°C.

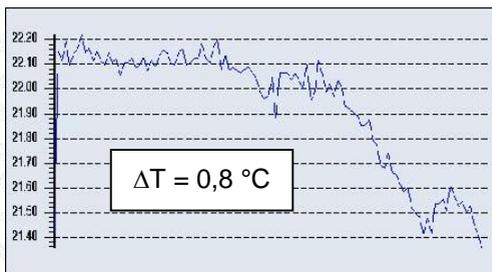
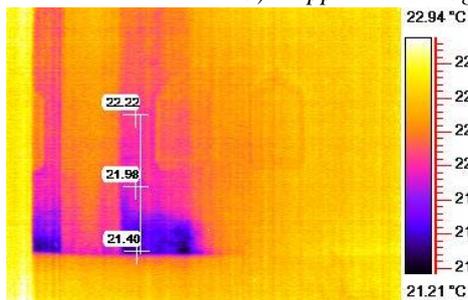
A titolo di esempio, si riporta in Figura 19 la scheda termografica di una delle zone sottoposte a controllo.



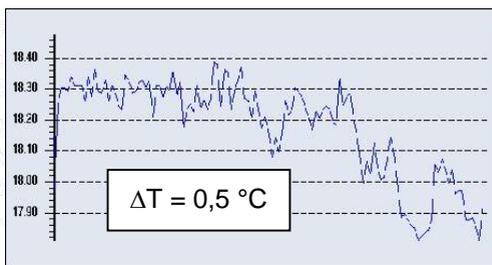
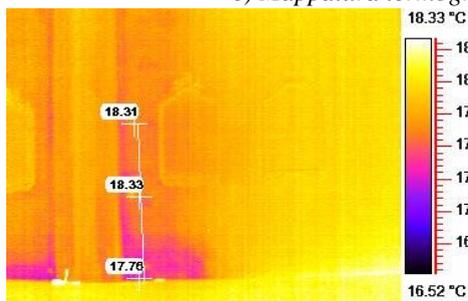
a) Immagine nel visibile



b) Mappatura termografica del maggio 2009



c) Mappatura termografica del settembre 2010

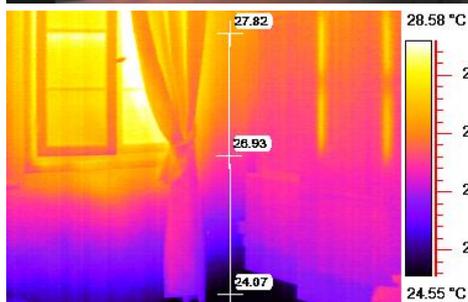


d) Mappatura termografica dell'aprile 2012

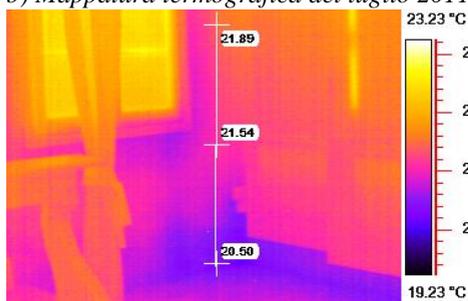
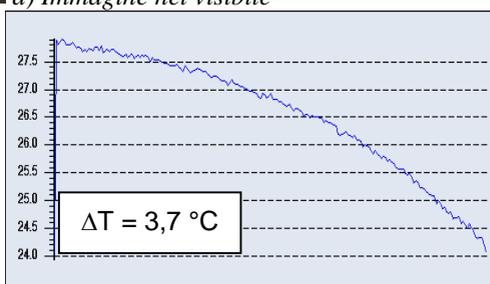
Fig.10 – Zona del Punto di misura S3: immagine nel visibile (a) e immagini termografiche e grafici delle temperature superficiali lungo la verticale rilevati nel maggio 2009 (b), settembre 2010 (c) e aprile 2012 (d)



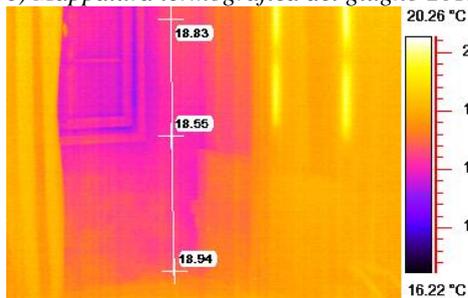
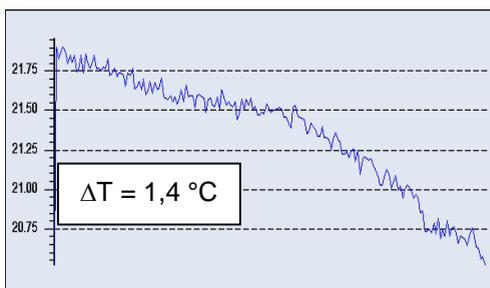
a) Immagine nel visibile



b) Mappatura termografica del luglio 2011



c) Mappatura termografica del giugno 2012



d) Mappatura termografica dell'ottobre 2013

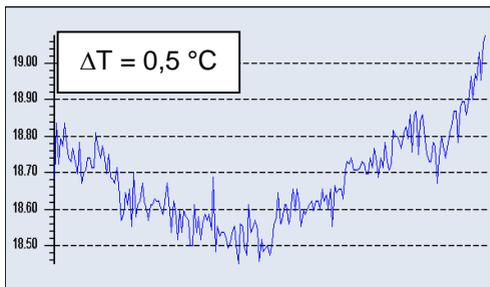
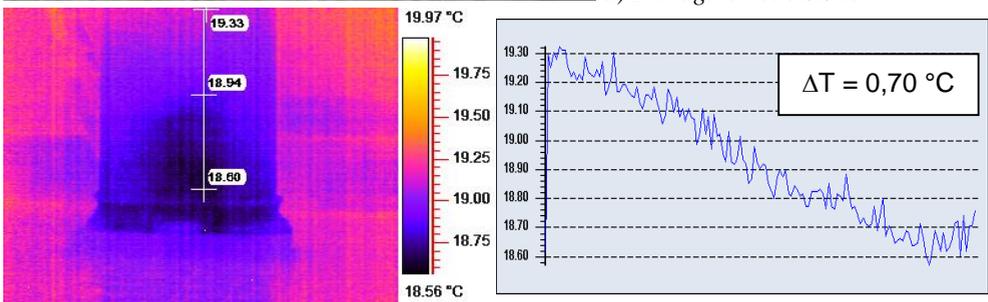


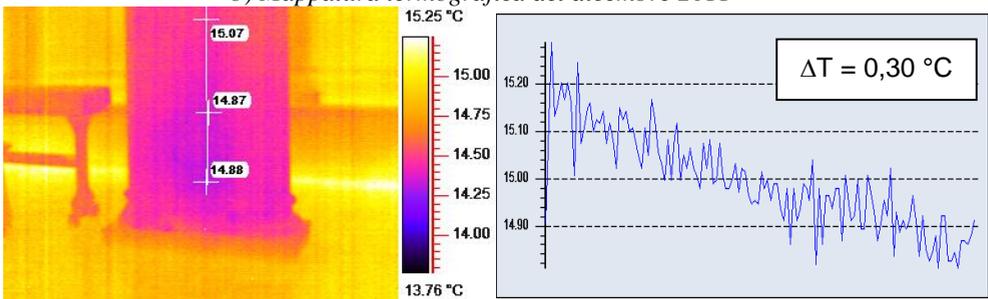
Fig.18 – S. ANTONIN, Zona Punti di misura P2A/B: immagine nel visibile (a) e immagini termografiche e grafici delle temperature superficiali lungo la verticale rilevati nel luglio 2011 (b), giugno 2012 (c) e ottobre 2013 (d)



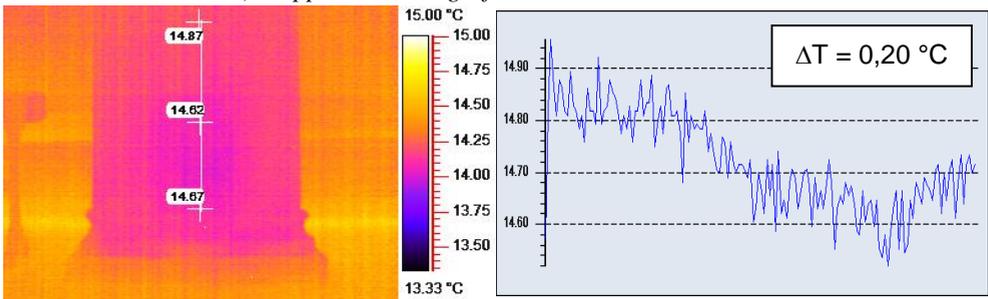
a) Immagine nel visibile



b) Mappatura termografica del dicembre 2011



c) Mappatura termografica del dicembre 2012



d) Mappatura termografica del febbraio 2014

Fig.19 – CRIPTA, Zona di controllo T28: immagine nel visibile (a) e immagini termografiche e grafici delle temperature superficiali lungo la verticale rilevati nel dicembre 2011 (b), dicembre 2012 (c) e febbraio 2014 (d)

## NOTE

<sup>1</sup> secondo Jurin, l'innalzamento  $h$  della colonna di liquido all'interno del capillare è inversamente proporzionale al raggio  $r$  del capillare stesso e risulta strettamente dipendente dal bilancio delle forze molecolari agenti all'interfaccia liquido-solido, ovvero dalla mutua interazione tra la forza di coesione liquido-liquido e quella di adesione liquido-solido.

<sup>2</sup> cfr. Milan Paunovic, Mordechay Schlesinger: “*Fundamentals of electrochemical deposition*”, Wiley, 1998, pp.42-43

<sup>3</sup> Elettro-capillarità: cfr. “*Fluid Control in Multichannel Structures by Electrocapillary Pressure*”, by M. W. J. Prins, W. J. J. Welters, J. W. Weekamp, Philips Research Laboratories Eindhoven, The Netherlands. SCIENCE Vol.291, pp.277-280, 12 January 2001 - Copyright © 2001 by the American Association for the Advancement of Science.

<sup>4</sup> Electrowetting: cfr. “*Low voltage electrowetting-on-dielectric*”, by Hyejin Moon and Sung Kwon Cho, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California, Los Angeles (UCLA); Robin L. Garrell, Department of Chemistry and Biochemistry, University of California, Los Angeles (UCLA); Chang-Jin “CJ” Kim, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of California, Los Angeles (UCLA). JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol. 92, No. 7, 1 October 2002.

<sup>5</sup> Definizione semplificata del principio di funzionamento della T.N.C. Domodry®. Per la spiegazione scientifica più completa e rigorosa, si rimanda all'apposita pubblicazione tecnica, che può essere richiesta gratuitamente a Domodry srl.

<sup>6</sup> L'espressione “tecnologia elettrofisica a neutralizzazione di carica” è utilizzata per identificare in modo univoco l'originale principio attivo di funzionamento che contraddistingue la tecnologia Domodry®. Si precisa altresì che tutti i contenuti delle suddette pubblicazioni sono tutelati dalle norme sulla protezione del diritto d'autore.

<sup>7</sup> L'emissione (induzione magnetica media) dell'apparecchio Domodry® è di gran lunga inferiore (circa 20 volte meno) a quella di un normale elettrodomestico, risultando pari a 0,015  $\mu$ T (microTesla) come da apposita certificazione dell'Istituto Giordano di Rimini, attestante la totale innocuità dell'apparecchio stesso.

<sup>8</sup> I risultati delle sperimentazioni condotte dal Politecnico di Milano sono stati pubblicati tra il 2007 e il 2009.

<sup>9</sup> La T.N.C. assicura il mantenimento del risultato illimitatamente nel tempo, a condizione che l'impianto venga mantenuto permanentemente in funzione. Nel caso ci sia un guasto (identificabile tramite le apposite spie di controllo poste sull'apparecchio), l'utente è tenuto a segnalarlo per consentire il ripristino del corretto esercizio dell'impianto.

<sup>10</sup> Sperimentazione condotta sotto la supervisione del Laboratorio F.T.Be.C. (Fisica Tecnica Ambientale per i Beni Culturali) – Dipartimento di Energia del Politecnico di Milano.

<sup>11</sup> Sperimentazione condotta sotto la supervisione della Soprintendenza per i Beni Architettonici e Paesaggistici di Venezia e Laguna (Dott.ssa Arch. Tiziana Favaro) e della Diocesi Patriarcato di Venezia.

<sup>12</sup> Sperimentazione condotta sotto la supervisione del MIBAC - Direzione Generale per il Paesaggio, le Belle Arti, l'Architettura e l'Arte Contemporanea (Segreteria Tecnica Roma) e del Dipartimento di Ingegneria dell'Innovazione dell'Università del Salento (Lecce)

## BIBLIOGRAFIA

AA.VV., 2013, Atti del Convegno Unesco “*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 in siti Unesco a Ragusa e in altri prestigiosi siti in Italia*”, Ragusa Ibla 5 e 6 ottobre 2012, Comune di Ragusa.

Bertolini L., Redaelli E., Valentini M., De Nicola E., 2007, Valutazione di un metodo elettrofisico per la rimozione dell'umidità da risalita capillare, Tesi di Laurea A.A. 2006/07, Politecnico di Milano, Facoltà di Ingegneria Edile / Architettura

Congedo P. M., D'Agostino D., D'Errico T., 2012, Studio sperimentale del fenomeno dell'umidità ascendente nelle murature, Tesi di Laurea A.A. 2011/12, Università del Salento, Facoltà di Ingegneria

Hyejin Moon, Sung Kwon Cho, Robin L. Garrell, Chang-Jin Kim, 2002, “*Low voltage electrowetting-on-dielectric*”, University of California, Los Angeles (UCLA), JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol. 92, No. 7, 1 October 2002.

Massari I., Massari G., 1985, *Il Risanamento igienico dei locali umidi*, Roma.

Paunovic M.; Schlesinger M., 1998, “*Fundamentals of electrochemical deposition*”, Wiley.

Prins M.W.J., Welters W.J.J., Weekamp J.W., 2001, “*Fluid Control in Multichannel Structures by Electrocapillary Pressure*”, Philips Research Laboratories Eindhoven, The Netherlands, SCIENCE Vol.291, pp.277-280, 12 January 2001 - Copyright © 2001 American Association for the Advancement of Science.

Roche G., 2012, *La Termografia per l'edilizia e l'industria. Manuale operativo per le verifiche termografiche*, Maggioli Editore, Santarcangelo di Romagna (RN).

Rossetto M., 2012, *Il sistema elettrofisico a neutralizzazione di carica Domodry® per la deumidificazione e il controllo dell'umidità nelle murature. Principio di funzionamento e casi applicativi*, SIAE Sez. Olaf – Servizio Opere Inedite, Roma.

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 Atti del Congresso scientifico "BUILT HERITAGE 2013: Monitoring Conservation Management", Politecnico di Milano 18-20 novembre 2013.

Valentini M., 2009, *Prime verifiche sull'efficacia di un sistema elettrofisico per la deumidificazione delle murature*, VII Congresso Nazionale IGIIC – Lo Stato dell'Arte – Napoli, 8-10 Ottobre 2009

Welters W.J.J., Fokink L.G.J., 1998, “*Fast Electrically Switchable Capillary Effects*”, Philips Research Laboratories Eindhoven, The Netherlands, LANGMUIR, Vol. 14, No. 7, pp.1535-1538, 10 March 1998 - Copyright © 1998 American Chemical Society.